

Treball de Fi de Grau
Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Adaptació aerodinàmica d'un automòbil de turisme a la competició

MEMÒRIA

Autor: Alejandro Loscos Enríquez
Director: Enric Trillas Gay
Convocatòria: Juliol 2015



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

El present treball pretén mostrar com aplicar la teoria de mecànica de fluids al món de l'automobilisme. Més concretament, l'objectiu principal és entendre com interacciona l'aire amb un automòbil de turisme quan aquest es troba circulant i quines millores aerodinàmiques es poden afegir per adaptar-lo a la competició. El treball es centra únicament en la millora aerodinàmica del vehicle mitjançant apèndixs aerodinàmics, conservant la geometria original del model i les seves prestacions, com són la potència del motor o l'adherència dels neumàtics.

Primerament, s'han introduït els conceptes bàsics de l'aerodinàmica, aplicats en aquest cas a l'automobilisme, ja que seran necessaris per avaluar posteriorment el funcionament de les millores aerodinàmiques introduïdes. Un cop explicats els diferents conceptes, s'ha dut a terme el disseny del model que s'emprarà en les simulacions. Donada la geometria complexa d'un automòbil, els càlculs s'han efectuat mitjançant simulacions per ordinador. S'ha escollit un model de automòbil tipus sedan, basat en el Volkswagen Passat B6. Un cop dissenyat, s'ha detallat tot el procés necessari per poder dur a terme la simulació del model quan aquest es troba circulant.

Amb els resultats del model de sèrie, s'han aplicat les diferents millores aerodinàmiques plantejades, explicant el seu funcionament teòric, el seu disseny i el comportament final simulat un cop s'han instal·lat al model. A banda dels resultats numèrics, en cada millora, així com en el model de sèrie, es mostra la visualització del flux, generada per la simulació, a diferents zones d'interès del vehicle per poder explicar el comportament del flux en cada regió.

Finalment, s'han dut a terme els diferents ajustos en els components aerodinàmics afegits per adaptar el vehicle a diferents circuits. Per quantificar quina millora s'aconsegueix amb cada ajust, s'ha dut a terme una simulació simplificada del comportament del vehicle en una volta a cadascun dels circuits.

Amb els resultats d'aquest treball, s'han pogut observar les diferències de comportament de les diferents millores quan aquestes s'estudien aïlladament o en models de vehicle diferents a l'emprat en aquest treball. També ha estat possible quantificar la millora de temps que representa adaptar aerodinàmicament un automòbil de turisme, així com el guany en maniobrabilitat que s'obté., i les limitacions que es tenen si no es fan altres millores en les prestacions del vehicle.



Sumari

RESUM	1
SUMARI	3
1. GLOSSARI	5
2. INTRODUCCIÓ	7
2.1. Objectius del projecte	7
2.2. Abast del projecte	7
3. CONCEPTES TEÒRICS AERODINÀMICS	8
3.1. Forces i moments aerodinàmics	8
3.2. Comportament d'un flux ideal al llarg d'un vehicle	10
3.3. Comportament d'un flux viscos al llarg d'un vehicle. Capa límit	13
4. ANÀLISI DEL MODEL DE SÈRIE	18
4.1. Model i mallat.....	18
4.2. Anàlisi mitjançant CFD	23
4.3. Visualització i discussió dels resultats	27
4.4. Estudi dinàmic del model.....	36
5. ELEMENTS AERODINÀMICS EN AUTOMÒBILS	42
5.1. Spoiler davanter	42
5.2. Aleró posterior.....	48
5.3. Faldons laterals	60
5.4. Alternatives descartades.....	64
5.4.1. Spoiler posterior	64
5.4.2. Efecte terra	65
5.4.3. Plaques d'enfonsament.....	65
6. AJUSTOS DELS COMPONENTS AERODINÀMICS.	67
6.1. Ajust de l'aleró	69
6.2. Ajust 1. Elevada càrrega aerodinàmica	72
6.3. Ajust 2. Poca càrrega aerodinàmica.....	75
6.4. Comparativa entre els dos ajustos	78
6.4.1. Spoiler davanter	78
6.4.2. Faldons.....	80
6.4.3. Aleró.....	82

7. SIMULACIÓ DE CURSA	86
7.1. Hungaroring. Circuit lent.....	88
7.2. Autodromo Nazionale di Monza. Circuit ràpid	89
7.3. Silverstone. Circuit equilibrat.....	91
8. PLANIFICACIÓ TEMPORAL I PRESSUPOST	93
8.1. Planificació temporal	93
8.2. Pressupost.....	94
9. IMPACTE AMBIENTAL	96
10. CONCLUSIONS	98
11. ANNEXOS	100
12. BIBLIOGRAFIA	103



1. Glossari

Aleró: perfil alar invertit emprat en l'automobilisme per generar càrrega aerodinàmica.

Angle de deriva: en anglès *slip angle*. És l'angle format entre la direcció real d'avanç del vehicle i la direcció a la que apunta el neumàtic. Aquesta diferència resulta en una força perpendicular a l'avanç del neumàtic encarregada de generar la força necessària per girar.

Bluff Body: cos amb geometria poc aerodinàmica, la qual dificulta que el flux el pugui envoltar fàcilment. Un exemple seria una placa plana avançant perpendicularment a la direcció del flux.

Capcineig: rotació del vehicle respecte a l'eix perpendicular a l'avanç del vehicle i paral·lel a terra.

CFD: sigles de mecànica de fluids computacional (de l'anglès *Computational fluid Dynamics*). Es tracta de l'ús d'algoritmes i anàlisis numèriques per resoldre, mitjançant un ordinador, les complexes equacions que regeixen el comportament dels fluids.

Chicane: en circuits de competició, és el nom que es dona a una sèrie de corbes tancades, en forma de S, emprades a les rectes llargues com a element de seguretat, ja que eviten que s'assoleixin velocitats massa elevades.

Difusor: conducte de secció variable. Poden ser convergents si la secció va disminuint a mesura que avança el flux o divergent si la secció augmenta.

Drag: força aerodinàmica que s'oposa a l'avanç d'un objecte que viatja per un fluid.

Efecte Venturi: efecte que es dona quan es fa passar un fluid per una secció que disminueix gradualment, fent que la pressió es redueixi i la velocitat augmenti. Posteriorment, es torna a augmentar gradualment la secció, per facilitar que el flux es pugui tornar a expandir i que la pressió augmenti, alhora que baixa la velocitat.

Extradós: cara superior d'un perfil alar.

Factors de relaxació: en CFD, és el nom que reben els factors que determinen el criteri del programa en cada iteració. Si són massa elevats, s'accelera la convergència de la solució però també augmenta la possibilitat de que es donin inestabilitats. Si són massa baixos, es té més estabilitat en la solució, però es poden obtenir resultats poc acurats o la solució pot tardar

massa en arribar a la convergència.

Intradós: cara inferior d'un perfil alar.

Lift: força aerodinàmica perpendicular a l'avanç d'un objecte que viatja per un fluid. Pot ser positiva o negativa, on en aquest cas s'anomena downforce.

Línia de corrent: representa la trajectòria que descriu una partícula individual en un flux.

Sobreviratge: tendència que té un vehicle a girar més de l'imposat pel volant.

Subviratge: tendència que té un vehicle a girar menys de l'imposat pel volant.

Streamlined body: cos amb geometria molt aerodinàmica, la qual permet que el flux l'envolti fàcilment. Un exemple seria el perfil d'un ala d'avió.

Túnel de vent: cambra dissenyada per generar un flux d'aire sobre el cos que s'està estudiant. Es pot emprar el model real o una maqueta a escala.

Vòrtex: flux turbulent que rota respecte a un eix. Pot ser bidimensional, si l'eix és perpendicular a l'avanç del flux, o tridimensional, si l'eix es paral·lel a l'avanç del flux, anomenat remoli marginal.

Vorticitat: magnitud que quantifica la rotació d'un fluid.

2. Introducció

L'aerodinàmica és l'aplicació de la mecànica de fluids a la situació de cossos que interaccionen amb un flux d'aire. Aquesta branca es ve estudiant formalment des del segle XVIII, tot i que s'ha emprat des de fa molts més segles abans. Inicialment aplicada a l'aeronàutica, no és fins a mitjans del segle XIX quan es comença a aplicar al món de l'automobilisme. Inicialment, no es tenien eines de càlcul potents i els estudis es feien mitjançant assajos. Gràcies a l'aparició del CFD i d'ordinadors cada cop més potents, que permeten efectuar càlculs més complexos en menys temps, avui en dia és possible simular fluxos d'aire sobre cossos de geometria complexa amb uns resultats prou acurats. Les possibilitats que atorguen aquests programes s'aprofiten en aquest treball per dur a terme la simulació d'un automòbil de turisme quan aquest es troba circulant i estudiar així les forces aerodinàmiques que es generen i el comportament del flux en diferents zones del vehicle.

2.1. Objectius del projecte

A partir d'aquesta primera simulació d'un model d'automòbil de sèrie, basat en un Volkswagen Passat B6, l'objectiu és dissenyar i afegir diferents millores aerodinàmiques que permetin adaptar el vehicle per poder competir en qualsevol cursa en circuit tancat. Així, s'estudiarà, tant qualitativa com quantitativament, les modificacions que s'aconsegueixen amb cada millora aerodinàmica respecte al model de sèrie. Addicionalment, es configuraran les millores afegides de diferent manera per aconseguir dos tipus d'ajustos, els quals s'adaptaran millor a un tipus de circuit. L'objectiu final és comprovar que amb els diferents ajustos s'aconsegueix millorar el rendiment del vehicle en competició, així com assegurar-se de que la seva maniobrabilitat s'ha vist augmentada.

2.2. Abast del projecte

El treball abasta únicament els resultats que es poden extreure amb CFD. Així, estudis alternatius, com poden ser túnels de vent o tests de l'automòbil amb les millores al circuit, queden descartats. També es limita les millores a aplicar al model. El treball es centra en l'aerodinàmica i, per tant, no es contempla qualsevol altre millora en altres prestacions, com l'augment de potència del motor o la reducció de la massa del vehicle. Tampoc es planteja cap modificació en la geometria original del model, ja que les millores aerodinàmiques es centren únicament en apèndixs que es puguin instal·lar en el model de sèrie.

3. Conceptes teòrics aerodinàmics

A l'hora d'analitzar els resultats obtinguts, serà necessari emprar diversos conceptes teòrics de l'aerodinàmica, en aquest cas aplicats als automòbils, per poder comprendre les dades obtingudes de les diferents anàlisis que s'efectuen amb l'objectiu de extreure tota la informació possible d'aquests resultats, així com detectar possibles errors en els càlculs.

El tipus de cos que s'estudia i les condicions ens les que es troba són importants, ja que caldrà aplicar conceptes teòrics específics, així com conèixer quins fenòmens especials es produeixen degut a la seva pròpia geometria. Per exemple, per a un mateix perfil geomètric, el flux desenvolupat al seu voltant no serà el mateix si aquest s'està desplaçant per terra que si ho fa per l'aire.

3.1. Forces i moments aerodinàmics

Les forces aerodinàmiques que es produeixen degut al desplaçament de l'automòbil afecten a la seva maniobrabilitat, així com a l'estabilitat i al control. Es poden distingir dues forces aerodinàmiques que es desenvolupen quan un cos es desplaça a través d'un fluid: una paral·lela a l'avanç i de sentit contrari (drag) i l'altre perpendicular a l'avanç i de sentit cap amunt (lift) o sentit cap a terra (negative lift o downforce).

Pel cas del drag, es té una força que s'oposa al desplaçament del vehicle i que condiciona la velocitat màxima que aquest pot aconseguir, així com l'acceleració que es pot aplicar a altes velocitats. L'equació que permet obtenir el drag total és:

$$D = \frac{1}{2} \cdot c_D \cdot A_f \cdot \rho \cdot V^2 \quad (1.1)$$

On c_D és el coeficient de drag, A_f és la projecció de l'àrea frontal de l'automòbil, ρ és la densitat de l'aire i V és la velocitat a la que circula el vehicle.

Per al cas del lift, es té una força perpendicular a l'avanç del vehicle. En el cas dels automòbils, la seva forma geomètrica tendeix a generar lift positiu, tot i que no arriba a perdre contacte amb el terra degut a que la component del pes del propi vehicle és més elevada.



L'equació que permet obtenir el lift total és:

$$L = \frac{1}{2} \cdot c_L \cdot A_s \cdot \rho \cdot V^2 \quad (1.2)$$

On c_L és el coeficient de lift, A_s és la projecció de l'àrea superior, ρ és la densitat de l'aire i V és la velocitat a la que circula el vehicle.

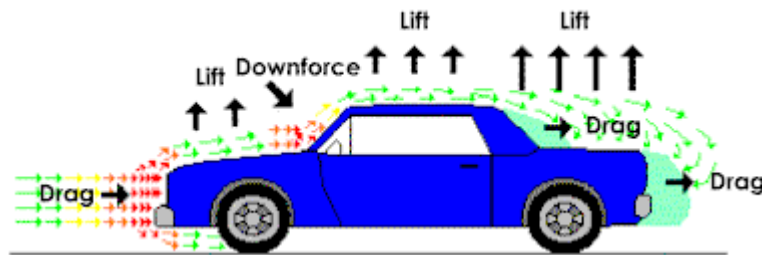


Fig. 3.1. Forces aerodinàmiques a la part superior de l'automòbil

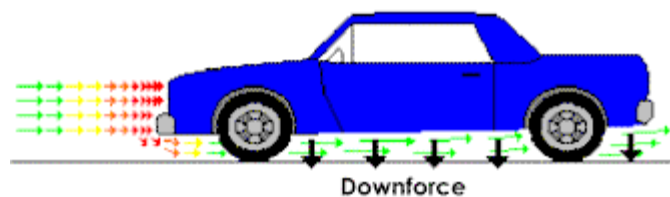


Fig. 3.2. Forces aerodinàmiques a la part inferior de l'automòbil

Tant el drag com el lift són forces resultants de la distribució de forces que es generen al voltant del vehicle degut a la interacció de l'aire amb aquest (figures 3.1 i 3.2). Així, si es projecten totes les forces que es generen a l'automòbil sobre l'eix paral·lel a la direcció d'avanç del vehicle, s'obté el drag resultant, mentre que si es projecten sobre l'eix perpendicular a l'avanç s'obté el lift resultant. De la mateixa manera que ocorre amb altres distribucions de forces sobre un objecte, com la gravetat, es té un punt geomètric on s'apliquen les forces resultants. La posició d'aquest punt és tal que, si es calcula el moment de la distribució de forces respecte a aquest punt, s'obté com a resultat zero. Per tant, en el cas de les forces aerodinàmiques, es tindrà un punt geomètric, anomenat centre de pressions, on s'aplicaran les forces de drag i lift. Si es calcula el moment de la distribució de forces aerodinàmiques respecte al centre de pressions s'obté com a resultat zero (figura 3.3).

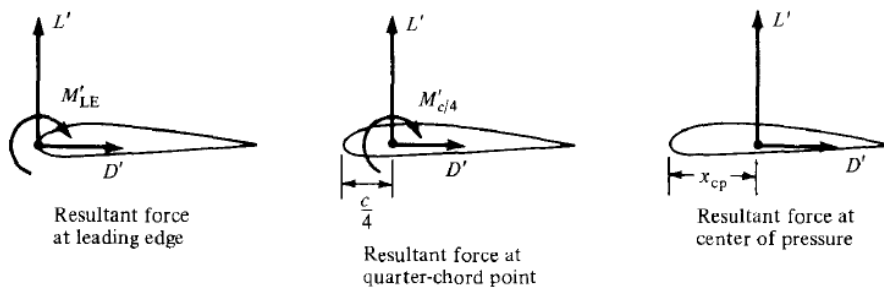


Fig. 3.3. Posició del centre de pressions. En aquest punt el moment de les forces resultants és zero.

El centre de pressions no ha de correspondre necessàriament a cap punt material del cos, donat que és un punt teòric que facilita els càlculs quan es tenen distribucions de pressions, però que no existeix com a tal.

3.2. Comportament d'un flux ideal al llarg d'un vehicle

Quan l'automòbil comença a accelerar, es produeix una circulació de l'aire que envolta tot el cos fins que s'arriba a una velocitat determinada i s'assoleix l'estat estacionari. Per fer un primer estudi del comportament del flux d'aire al llarg del vehicle, es considera que aquest està format per línies de corrent, una d'amunt de l'altra, on cadascuna conté les successives partícules amb velocitat tangent a aquesta línia per a un instant t . Donat que es treballa en estat estacionari, les línies de corrent no varien en el temps.

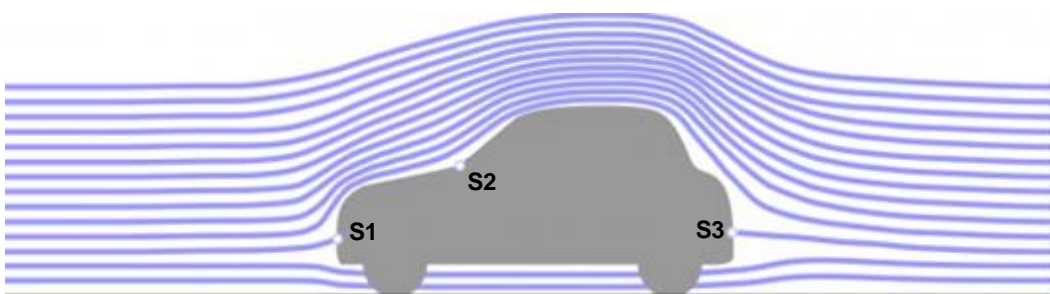


Fig. 3.4. Distribució teòrica de les línies de corrent sobre un automòbil



Si s'agrupen diverses línies de corrent es poden formar tubs de corrent, cadascun aïllat dels altres, on es considera el fluid que els travessa incompressible i no viscos i on l'energia es manté constant al llarg de tot el tub. Cada tub de corrent recorre el vehicle, modificant la seva trajectòria per adaptar-se a la forma geomètrica del cos. Per saber com es comporta el flux d'aire al llarg del vehicle, s'utilitza l'equació de Bernoulli per a un fluid ideal:

$$P + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 = \text{cnst} \quad (1.3)$$

On P es la pressió, ρ es la densitat i V és la velocitat del fluid. Aquesta equació implica que la suma de la pressió estàtica (P) i la pressió dinàmica ($\rho \cdot V^2/2$) ha de ser constant per a cada línia de corrent, variant la constant depenent de la línia escollida. D'aquesta manera, es pot estudiar el canvi de pressió i de velocitat de l'aire al llarg de l'automòbil.

Per aplicar l'equació, s'ha de considerar que el fluid és no viscos i incompressible, també anomenat fluid ideal, que és el tipus de flux establert que circula pels tubs de corrent. Per tant, es podrà aplicar l'equació escollint dos punts qualsevols d'una de les línies de corrent que recorre el vehicle. Perquè l'equació es pugui emprar entre dos punts qualsevols del flux, independentment de que aquests estiguin en línies de corrent diferents, es considera també que el flux és irrotacional.

D'aquesta manera, es pot predir qualitativament com variarà el flux d'aire al llarg del vehicle. A partir de la llei de la conservació de la massa, i donat que el fluid és incompressible, es té la condició de continuïtat, on es considera que el caudal és sempre constant al llarg de tot el flux:

$$Q = V \cdot S = \text{constant} \quad (1.4)$$

On V és la velocitat del fluid i S és la superfície transversal d'un tub de corrent.

Considerant el flux bidimensional al llarg del vehicle amb una pressió i velocitat inicial determinada, aquest es desplaçarà al llarg del vehicle adaptant-se a la seva forma. Al principi,

l'aire que circula per la part superior recorrerà el capo i el parabrises davanter fins arribar al punt de màxima altura al sostre. En aquest trajecte, les línies de corrent s'ajunten, fent que es redueixi l'àrea transversal dels tubs de corrent, tal com s'observa a la figura 3.4. A partir de Eq.(1.4), s'extreu que, perquè el cabal romangui constant, la velocitat ha d'augmentar. Emprant ara Eq.(1.3), se sap que, a l'augmentar la velocitat, la pressió estàtica ha de disminuir perquè la pressió total romangui constant, obtenint el punt de màxima velocitat i de mínima pressió al sostre, on les línies de corrent estan més juntes. A partir d'aquest punt, les línies de corrent comencen a separar-se a mesura que el fluid es desplaça cap a la part posterior i la velocitat es va reduint mentre que la pressió augmenta fins que el flux abandona el vehicle. Per al cas de l'aire que circula per la part inferior, les línies de corrent es mantindran a una distància relativament constant les unes de les altres, ja que la separació entre el terra i la part inferior de l'automòbil varia molt poc.

D'aquesta manera, es pot graficar la distribució de pressions al llarg del vehicle. Emprant el coeficient de pressió, es pot comprovar com varia la pressió i les zones on es produeixen punts d'estancament ($V=0$, $c_p=1$) i zones de succió ($c_p<0$). Per calcular el coeficient de pressió coneguda la velocitat, es té la següent equació per a un fluid incompressible:

$$c_p = \frac{P - P_\infty}{q_\infty} = 1 - \left(\frac{V}{V_\infty}\right)^2 \quad (1.5)$$

On P es la pressió local, P_∞ és la pressió inicial del fluid, q_∞ és la pressió dinàmica a velocitat i densitat inicial, V és la velocitat local del fluid i V_∞ és la velocitat del fluid inicial.

Per la part superior del vehicle, es tenen 3 punts d'estancament: al para-xocs frontal, a la unió del capo amb al parabrises davanter i a la cua del vehicle, senyalats a la figura 3.4 com S1, S2 i S3 respectivament. Les zones de succió es troben a la part del capo abans d'arribar al punt d'estancament amb el parabrises i al llarg del sostre, on el fluid s'accelera i fa disminuir la seva pressió, generant un lift positiu. Per la part inferior del vehicle, es genera un lift negatiu més o menys significatiu depenent de diversos factors, com l'altura del vehicle respecte al terra.



El lift generat a la part superior és més elevat que el downforce generat a la part inferior, fet que provoca un lift total positiu que tendeix a separa el vehicle del terra.

3.3. Comportament d'un flux viscos al llarg d'un vehicle. Capa límit

L'estudi d'un flux ideal al voltant d'un cos queda limitat a l'anàlisi de les distribucions de pressions i velocitats. En aquest cas, es pot discernir les zones de l'automòbil on es produeixen punts d'estancament i succió, així com una aproximació del lift total que es genera, informació important per aplicar millores posteriorment. Pel que respecta al drag, si s'integrés la distribució de pressions, s'obtindria un drag igual a zero, resultat gens fidedigne amb l'experiència real. Aquest resultat es coneix com la paradoxa de D'Alembert, que demostra que, per a qualsevol cos que es mou a velocitat constant a través d'un fluid ideal, aquest presentarà una força de drag igual a zero. Això es degut a que s'han negligit els efectes viscosos que es produeixen a la zona propera a la superfície del cos.

Per fer l'estudi del flux al voltant d'un cos considerant els efectes viscosos, es treballa considerant una regió petita del fluid d'uns pocs mil·límetres de gruix en contacte amb la superfície del cos on actuen les forces viscoses, anomenada capa límit. Fora d'aquesta capa el flux es pot considerar no viscos, mentre que a l'interior es té un gradient de velocitats des de la superfície, on la velocitat del fluid és zero, fins a la frontera de la capa límit, que per definició es troba a una altura tal que la velocitat en aquest punt sigui un 99% de la velocitat del corrent lliure (velocitat inicial del fluid). D'aquesta manera queda definit el gruix de la capa límit, tal com s'observa a la figura 3.5.

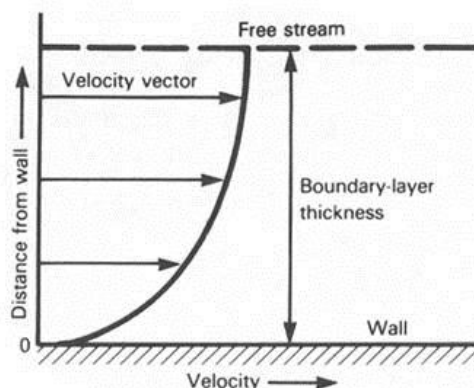


Fig. 3.5. Distribució de velocitats a la capa límit

Al considerar ara els efectes viscosos, la condició de fluid ideal no queda garantida per a tot el flux i ja no es pot emprar Eq.(1.3) entre dos punts qualsevols. Per assegurar la condició de no viscositat, cal escollir una línia de corrent que es trobi fora de la capa límit, on les forces tangencial degudes a la fricció amb la superfície no actuen. Per al cas de la condició d'incompressibilitat, aquesta queda garantida per les condicions de treball de l'aire, ja que sempre es tenen velocitats subsòniques amb un nombre de Mach petit.

Es poden distingir dos tipus de capa límit: laminar o turbulenta. La capa límit laminar es produeix a la part frontal del cos quan el fluid entra en contacte amb aquest. En aquestes condicions, el flux és estable sense fluctuacions de la velocitat. A mesura que el flux avança, el gruix de la capa límit va augmentant. A partir de certa distància de la vora d'entrada, es produeix una transició que deriva en el pas de capa límit laminar a turbulenta. En aquest cas, el flux a l'interior de la capa límit es torna inestable, i ara la velocitat no només depèn de la distància respecte de la superfície sinó també del temps. Es treballa, per tant, amb la mitjana temporal de la velocitat, tenint en compte que addicionalment es produeixen fluctuacions del flux en totes direccions. El gruix de la capa límit continua augmentant, ara amb més rapidesa, i la velocitat del flux a la regió propera a la superfície s'incrementa, fent que el gradient de velocitats sigui més elevat en aquesta zona i que augmentin les forces de fricció, tal i com s'observa a la figura 3.6.

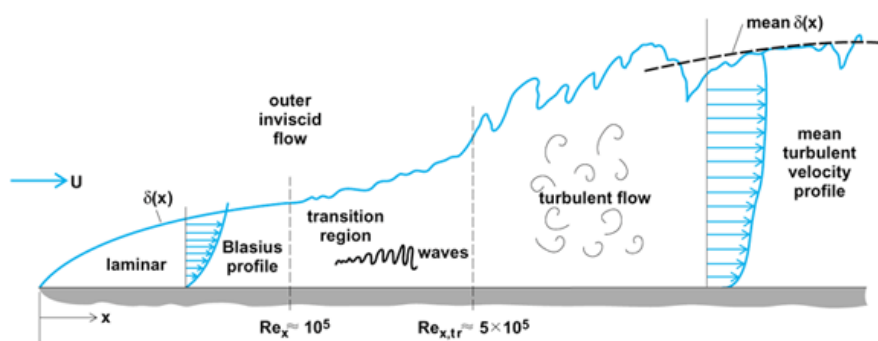


Fig. 3.6. Evolució de la capa límit de laminar a turbulenta

Per estudiar l'evolució del comportament del flux a la capa límit, es pot fer l'estudi d'un flux d'aire al voltant d'una placa plana. Per fer els càlculs, es pren una longitud de 5 metres, valor que es correspon amb la longitud d'un sedan convencional, i una velocitat de 200 km/h (55,56 m/s), aproximadament la màxima que es podria adquirir.



Per analitzar numèricament si un flux es laminar o turbulent, s'empra un número adimensional conegut com el nombre de Reynolds:

$$Re = \frac{V_{\infty} \cdot l \cdot \rho}{\mu} \quad (1.6)$$

On V_{∞} és la velocitat del fluid inicial sense alterar, l és la longitud característica del cos, ρ és la densitat i μ la viscositat dinàmica del fluid.

Sabent que la transició de laminar a turbulent es dona a un Reynolds de $5 \cdot 10^5$ i amb una densitat de l'aire $\rho = 1,19 \text{ kg/m}^3$ i una viscositat dinàmica $\mu = 1,825 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$, s'obté que la transició es dona a 0,138 m a partir del següent càlcul:

$$x_t = \frac{Re_t \cdot \mu}{V_{\infty} \cdot \rho} = \frac{5 \cdot 10^5 \cdot 1,825 \cdot 10^{-5}}{55,56 \cdot 1,19} = 0,138 \text{ m}$$

Es pot calcular també teòricament el gruix màxim que assolirà la capa límit per la mateixa placa i amb les mateixes condicions amb la següent equació:

$$\delta_{max} \approx \sqrt[5]{\frac{\mu}{\rho \cdot V_{\infty}}} \cdot l^{4/5} = \sqrt[5]{\frac{1,825 \cdot 10^{-5}}{1,19 \cdot 55,56}} \cdot 5^{4/5} = 0,177 \text{ m}$$

La longitud de la capa límit laminar representa només un 2,76 % de la longitud total, fet que permet considerar que tota la capa límit es comporta com turbulenta. Cal mencionar que aquest càlcul no és gens acurat, ja que s'ha aproximat la geometria d'un automòbil a una placa plana de poc gruix. L'objectiu del càlcul anterior és demostrar que, per a cossos de longitud i velocitat elevada, la capa límit laminar es pot negligir enfront de la turbulenta.

Fins ara, s'ha estudiat com evoluciona la capa límit quan es dona un flux al voltant d'una placa plana. Una factor important que ocorre degut a la seva geometria és que no apareix cap gradient de pressions en la direcció del flux. Al ser la superfície sempre paral·lela a la direcció

d'avanç del fluid, la velocitat del corrent lliure (exterior a la capa límit) romandrà constant i igual a la velocitat inicial segons Eq.(1.4), donat que la superfície transversal no varia. Es pot donar el cas que, degut a la geometria del cos, el flux es trobi amb un gradient de pressions advers (positiu). En aquestes condicions, s'ha de considerar la possible separació de la capa límit. Si la pressió va augmentant a mesura que avança el fluid, la velocitat s'anirà reduint segons Eq.(1.3). Aquesta disminució és més important a la capa límit, on alhora actuen els esforços viscosos i es té un gradient de velocitats, fet que pot provocar que la velocitat arribi a zero i que el flux no pugui avançar més, generant una recirculació en direcció contrària que propiciarà la separació de la capa límit, tal i com es pot observar a la figura 3.7.

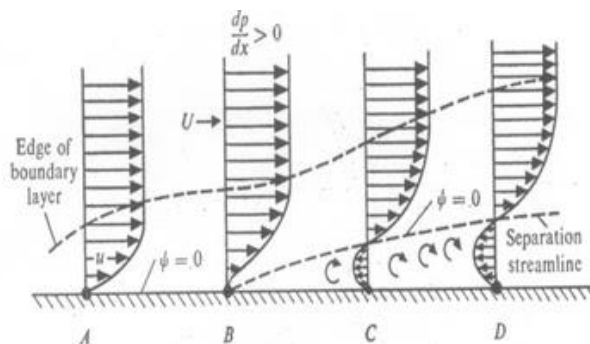


Fig. 3.7. Procés de separació de la capa límit

La separació de la capa límit és un factor molt important a tenir en compte, ja que és la causant de l'aparició de vòrtexs i recirculacions del flux que contribueixen a l'augment del drag. Aquesta separació es pot dividir en dos tipus diferents. Un primer tipus es la separació de la capa límit que genera vòrtexs bidimensionals amb l'eix de rotació perpendicular a l'avanç del flux. Es genera una zona de baixes velocitats i pressions, degut a que el vòrtex dissipa ràpidament la seva energia cinètica transformant-la en calor. El segon tipus de separació es caracteritza per una separació de la capa límit inclinada respecte a la direcció del flux, la qual genera vòrtexs perpendiculars al flux amb el seu eix de rotació aproximadament paral·lel a la direcció d'avanç, anomenats remolins marginals. En aquest cas el vòrtex avança amb el flux, creant una separació del flux tridimensional amb forma helicoidal. Com en el cas anterior, això provoca una pèrdua substancial d'energia cinètica en forma de calor, amb el corresponent augment de drag.

Fins ara s'ha vist que es poden distingir dos tipus de drag, cadascun originat per diferents factors: un drag de fricció, provocat pels efectes viscosos del fluid amb la superfície del cos a



la capa límit, i un drag de pressió, degut a la separació de la capa límit, que origina una diferència de pressió negativa entre la part frontal i la part davantera del cos. Pel cas d'un automòbil, es té una geometria de tipus bluff, la qual genera principalment drag per pressió, a diferència d'una geometria streamlined, com pot ser el cas d'un ala d'avió, on la major part del drag es produeix per fricció, donat que no es dona separació de la capa límit.

Si es considera la superfície del vehicle com una placa plana, es pot fer una estimació de l'aportació de drag de fricció enfront del drag de pressió per discernir quina quantitat aproximada aporta cadascun [1]. Aquest valor resulta ser de 0,035. El C_D actual dels turismes es troba entre 0,25 i un 0,45. Considerant que aquest és de 0,35, es té que el drag degut a la fricció representa un 10% del drag total. Per al càlcul, s'ha considerat que la part inferior del vehicle és llisa com la part superior. En els models reals, la part inferior es troba plena d'obstacles (eixos de les rodes, tubs d'escapament, etc.) i, per fer el càlcul més acurat, es pot considerar que la superfície inferior de la placa és molt rugosa. Fent aquesta aproximació més real, es té un augment del C_{Df} d'aproximadament 0,07. En aquest cas, el C_{Df} total és de 0,105 i representa ara el 30% del drag total. Aquest resultat fa palesa la major importància que té el drag de pressió enfront al drag de fricció en els automòbils, tot i que aquest últim no es pot menystenir, ja que representa un terç del drag total.

4. Anàlisi del model de sèrie

Prèviament al disseny i l'estudi de les diferents millores aerodinàmiques que es poden afegir a un automòbil per adaptar-lo a la competició, s'ha portat a terme un primer estudi sobre el model de sèrie al qual, posteriorment, se l'afegiran les diferents millores. Aquest primer estudi pretén, per una part, validar el disseny del model emprat, comparant els resultats obtinguts amb els que s'acostumen a obtenir en aquests tipus de vehicles. També permet visualitzar com es comporta el flux d'aire al circular per les diferents zones del vehicle, així com poder comparar posteriorment com canvia el comportament de l'aire a l'afegir les diferents modificacions. L'estudi ha estat fet amb el programari Fluent, un software basat en la mecànica computacional de fluids (CFD), desenvolupat per l'empresa Ansys.

4.1. Model i mallat.

El model utilitzat ha estat dissenyat amb el programari SolidWorks a partir del disseny i les cotes d'un Volkswagen Passat B6 (annex A). Fent servir l'eina spline, s'han dibuixat els diferents contorns del vehicle, fent-los coincidir amb els plànols superposats. Amb els diferents splines s'han generat diverses superfícies que es van unint i adaptant a la forma del vehicle. Finalment, un cop totes les superfícies estan unides, es pot donar volum al cos, obtenint així el model sòlid del vehicle, afegint per últim les rodes. A la figura 4.1 es poden veure diferents parts del procés.

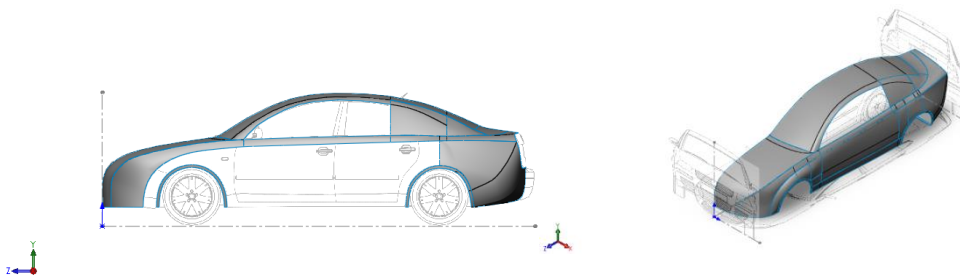


Fig. 4.1. Parts del procés de disseny del model emprat en les anàlisis

El model final es mostra a la figura 4.2. Visualment no s'assembla al disseny del Volkswagen Passat dels plànols, però les seves dimensions sí s'adapten als seus contorns, així com a la seva forma tipus sedan, ja que la utilitat dels plànols és, més que obtenir un model exacte, poder dissenyar un model amb formes realistes.



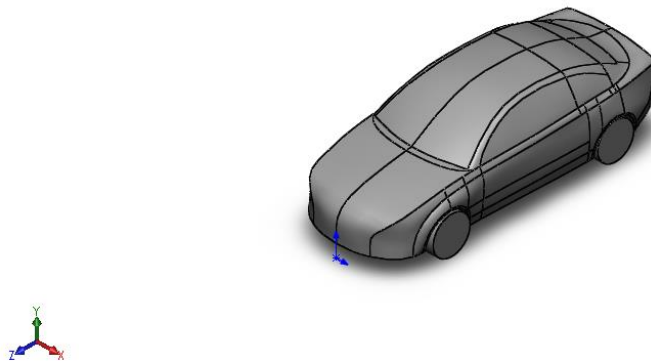


Fig. 4.2. Vista del model final emprat

Degut a la necessitat d'agilitzar els càlculs computacionals, donades les limitacions de l'ordinador emprat, i per evitar errors en el mallat degut a la forma complexa del model, s'han efectuat una sèrie de simplificacions:

- **Eliminació dels retrovisors:** el seu mallat comporta problemes degut a que estan compostos de petites superfícies que dificulten el procés, i degut també a la seva unió amb el vehicle. Per altra banda, tot i que no es puguin negligir, ja que modifiquen el flux i tenen una petita aportació al drag total, el seu estudi queda fora d'aquest treball, ja que les diferents mesures a incorporar no ajuden a minvar el drag produït per aquests i la seva aportació al drag total seria molt semblant en els diferents models.
- **Simplificació de la unió del capo amb el parabrisa davanter:** degut al petit angle que es forma en la seva unió es generen elements molt poc acurats que poden generar resultats gens fidedignes a les zones del voltant. Per evitar-ho, la unió es duu a terme allargant el capo fins que aquest topa amb el parabrisa.
- **Geometria sense arrodoniments:** tot i que els arrodoniments per defecte no compliquen el mallat si que pot produir problemes d'entrecruament d'elements. Així, s'ha decidit prescindir de qualsevol arrodoniment posterior ja que, a part dels problemes que pot comportar amb el mallat, tenen un efecte negligible amb els resultats.

- **Fons pla:** la part inferior del vehicle del model és completament plana i no contempla cap obstacle, a diferència d'un model real on diferents elements com eixos, barres i dipòsits dificulten el pas d'aire per aquesta zona. Aquesta simplificació repercutirà en els resultats que s'obtinguin, sobretot en la força de drag generada, tal i com es demostrarà en apartats següents.
- **Massa homogènia:** el model només contempla la geometria exterior, tot l'interior delimitat per les superfícies del vehicle es troba omplert homogèniament. No s'han tingut en compte espais buits, com el maleter o la cabina de passatgers, ni tampoc elements addicionals que afegeixen massa, com el motor. Aquesta simplificació repercutirà en la posició del centre de masses.
- **Flux intern nul:** tot el flux que incideix sobre el vehicle l'envolta. No s'ha considerat cap entrada d'aire que recorri l'interior del vehicle, com pot ser les reixes frontals destinades a refrigerar el motor o l'obertura de les llantes per refredar els frens.

Per poder treballar amb el programari Fluent, s'ha de fer servir un motlle del model, on el sòlid representa el domini per on circularà el fluid, mentre que les superfícies que delimiten les zones buides corresponen al model de l'automòbil (figura 4.3). El motlle s'ha generat a partir de la intersecció del model amb un prisma rectangular de dimensions 5x20x5m. A continuació, es procedeix al seu mallat.

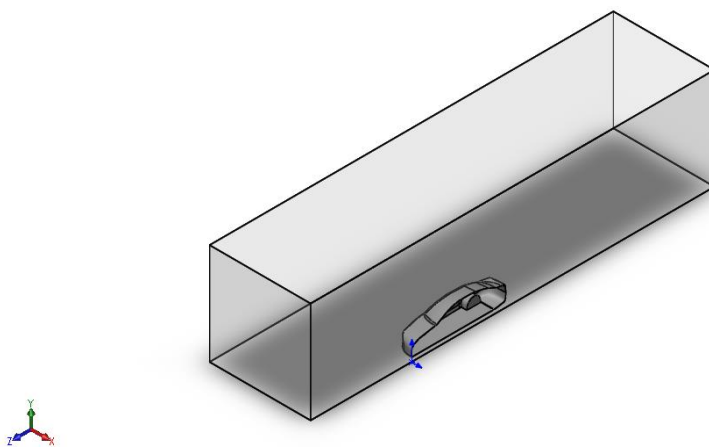


Fig. 4.3. Motlle del model emprat en les diferents anàlisis



L'elecció de les propietats del mallat són molt importants, ja que aquestes definiran si els resultats que s'obtinguin posteriorment són acurats. El procediment que se segueix es començar amb un mallat amb poca resolució, compost de pocs elements, i efectuar una primera anàlisi. Si aquesta convergeix i els resultats obtinguts són estables, es fa un segon mallat amb aproximadament 1,5 vegades més elements que el primer. Com en el cas anterior, si l'anàlisi convergeix i els resultats són estables, es fa un tercer mallat amb aproximadament 2 vegades més elements que el primer. Comparant els resultats, si s'observa que aquests es mantenen constants en cada mallat, es pot assegurar que són independents de la resolució del mallat i es poden considerar correctes. Tot i això, es pot continuar augmentant el nombre d'elements, així com refinar diferents zones d'interès, per obtenir més detall en la visualització dels resultats, però aquest augment en el nombre d'elements està limitat per les característiques de l'ordinador que s'emptra per fer l'anàlisi.

A la taula 4.1 es mostren les característiques de l'ordinador utilitzat per fer els càlculs, les quals limiten el nombre d'elements màxim en el mallat, ja que a partir de cert valor, fluent es satura i no pot dur a terme l'anàlisi

Sistema operatiu	Windows 7
Tipus	64 bits
Processador	Intel Core i3
Velocitat del processador	2,13 GHz
Nombre de processadors	4
RAM	4 GB

Taula 4.1. Característiques principals de l'ordinador emprat per fer els càlculs

A la taula 4.2 es mostren les propietats dels diferents mallats i les operacions aplicades per cadascun, seguint els passos esmentats. En cadascun, les propietats s'han mantingut constants i es pot assegurar la independència de la resolució del mallat. A la figura 4.4 es mostra el mallat final emprat.

Nombre d'elements	Mida mínim (mm)	Mida màxima (mm)	Operacions
810.446	150	300	Face sizing 100 mm
1.123.984	150	300	Face sizing 100 mm Edge sizing 100 mm Body sizing 250 mm Body of influence 100 mm
1.577.950	150	300	Face sizing 80 mm Edge sizing 80 mm Body sizing 250 mm Body of influence 70 mm

Taula 4.2. Comparativa dels tres mallats amb les operacions efectuades en cadascuna

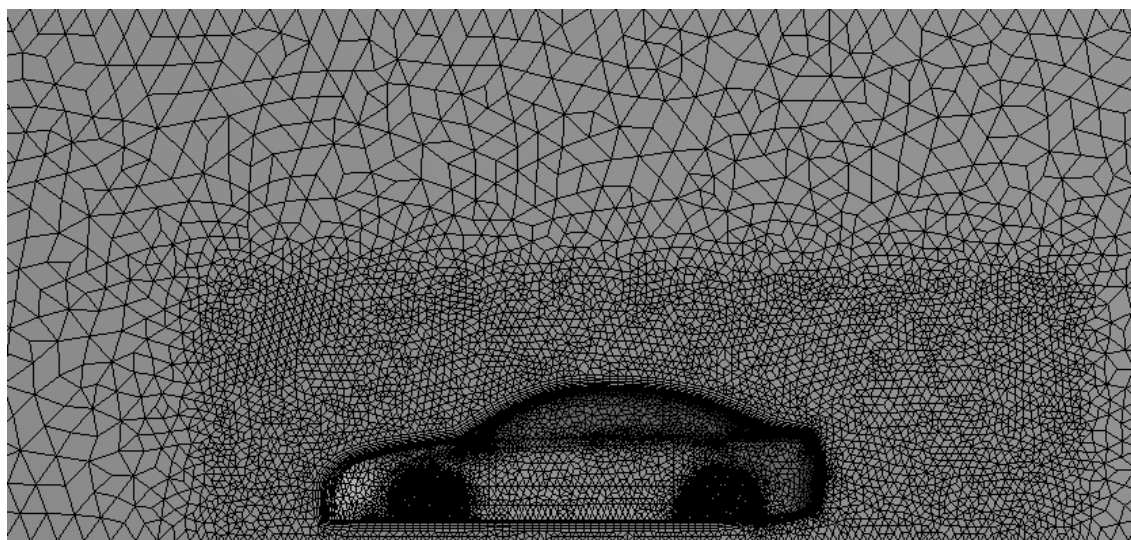


Fig. 4.4. Mallat final del model emprat

Es poden dividir les diferents operacions emprades en dos tipus: sizing i body of influence. La primera s'utilitza per definir més acuradament la mida dels elements que formen el mallat. Es pot ajustar tant de les superfícies que formen el vehicle com de les arestes que generen aquestes superfícies (face i edge sizing respectivament). També es pot fixar la mida dels



elements corresponents al volum ocupat pel fluid amb l'operació body sizing. La segona operació, body of influence, s'utilitza per augmentar la resolució del mallat a la regió propera al vehicle sense augmentar excessivament el nombre d'elements totals, ja que és on interessa tenir una major exactitud en els càlculs.

A part, en cadascun dels mallats s'ha efectuat l'operació inflation. Aquesta permet que la zona del mallat que envolta el vehicle estigui formada per capes rectangulars de poc gruix per poder estudiar correctament els efectes de la capa límit. Depenent del tipus d'inflation que se seleccioni, es pot definir des del gruix total de la capa fins a l'índex de creixement entre les diferents capes. Pel cas del mallat d'automòbils, l'inflation recomanat és First aspect ratio 5, amb un índex de creixement del 20 % i nombre de capes 5[2].

4.2. Anàlisi mitjançant CFD

Un cop s'ha generat el mallat, aquest s'importa al programari Fluent. A la figura 4.5 es mostra la seva interfície un cop s'ha carregat el model. Primerament, amb l'opció check es comprova que el mallat és correcte i que no hi ha cap incongruència, com podria ser volums i/o àrees negatives. Addicionalment, sempre és adient realitzar un Smooth per millorar la qualitat del mallat i intentar reparar qualsevol element amb geometria irregular. A continuació, el procediment a seguir es anar seleccionant per ordre les diferents opcions disponibles, marcades a la figura 4.5, que permeten definir el tipus d'anàlisi a realitzar.

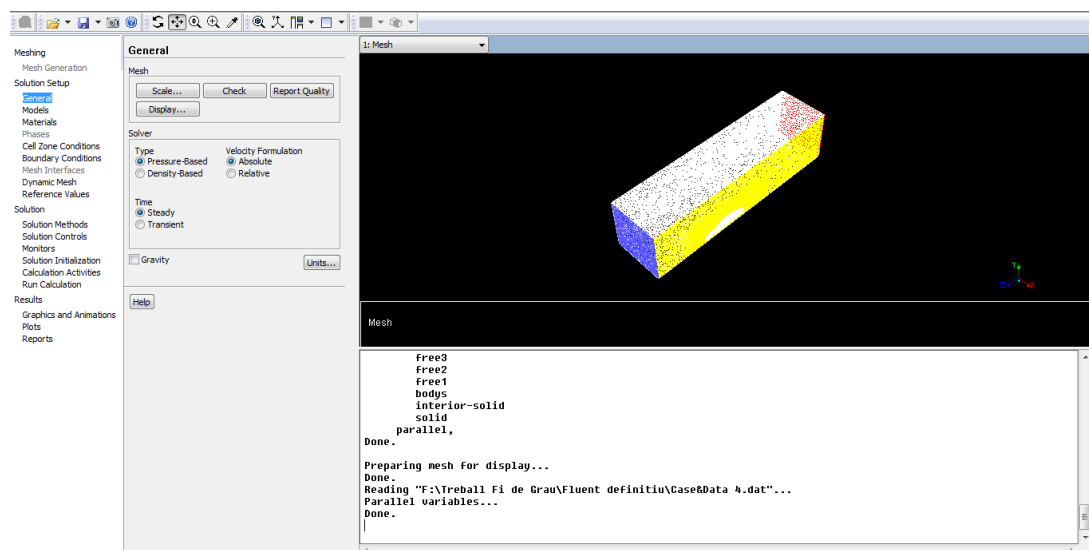


Fig. 4.5. Interfície del programari Fluent amb el model carregat

La primera opció a modificar és Models. En aquest apartat es defineix el tipus de flux que recorrerà el vehicle, així com les equacions a emprar que determinaran el seu comportament. El model més utilitzat és el K-epsilon ($k-\epsilon$), donat que és el més senzill i s'obtenen resultats acurats. Aquest model s'utilitza per simular les característiques mitjanes del flux en condicions turbulentes que, com s'ha demostrat a l'apartat 3.3, es pot considerar que es donen a tot el vehicle. Així, s'hauran de trobar els valors de k , que determina l'energia cinètica deguda a les turbulències, i de ϵ , que determina la dissipació de les turbulències. La convergència d'aquests dos termes és un dels factors que permet validar que els resultats són correctes.

La següent opció a modificar és Boundary Conditions. En aquesta part és on es defineixen les condicions de contorn que especifiquen com es comporta el fluid a les diverses parets que formen el model. A la figura 4.6 es mostra la nomenclatura de les parets que componen el volum per on circularà l'aire. Com a simplificació, es considera que no hi ha cap flux d'aire addicional produït pel vent i que l'aire és estàtic. La generació del flux d'aire només es deguda a l'avanç del vehicle. Per tant, aquest entra per la paret inlet, recorre el vehicle i surt per la paret outlet. Per a la paret inlet, s'imposa una velocitat d'entrada de l'aire de 50 m/s, que és la velocitat d'estudi del model, ja que es considera que serà la màxima que podrà assolir en circuit. Per a les parets paral·leles a la direcció d'entrada del flux (free1, free2, free3 i symmP) es fixa que l'aire hi circuli a 50 m/s, ja que la seva única funció es delimitar el domini de l'anàlisi i no repercuteixen en els resultats. Per a la resta de parets, formades per les superfícies que delimiten el vehicle i les rodes, s'imposa la condició de no lliscament.

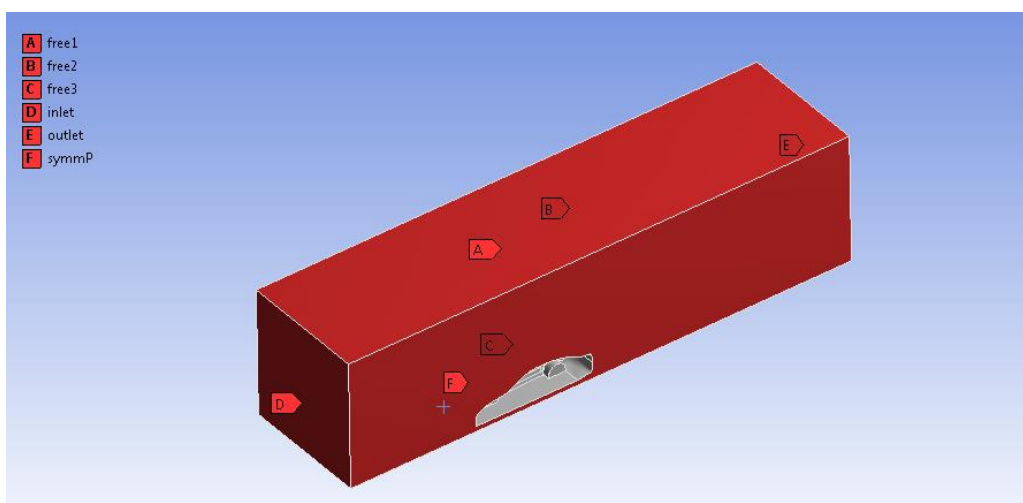


Fig. 4.6. Nomenclatura de les diferents parets del motlle



Així com a l'hora de fer el mallat s'han dut a terme simplificacions en la geometria del model, s'ha imposat una simplificació en les condicions de contorn de les rodes per ajudar a agilitzar els càlculs. Quan el vehicle es troba circulant, les rodes roten segons la velocitat a la que aquest avança, però en el model emprat aquestes s'han definit com parets estacionaries. Una condició de contorn més fidedigna seria imposar el gir d'aquestes parets respecte el seu eix de rotació i amb una velocitat angular tal que s'obtingui un avanç de 50 m/s, però d'aquesta manera la computació de l'anàlisi seria més complexa. A més d'agilitzar els càlculs, s'aconsegueix facilitar la convergència de la solució, ja que la condició de paret giratòria dificulta l'anàlisi i, si no es fixa acuradament la posició de l'eix i la rotació de la roda, es podria arribar al cas que el programa no aconseguís que es donés la convergència de la solució.

Les diferències que es produeixen en les forces aerodinàmiques generades per una roda que gira respecte a una estacionaria es mostren a la taula 4.3.

	$\omega=0$	$\omega \neq 0$
C_D	0,593	0,579
C_L	0,272	0,180

Taula 4.3. Valors dels coeficients aerodinàmics segons les rodes siguin estacionaries o rotin

El càlcul s'ha efectuat amb una roda individual sobre un terra estacionari [3]. Tot i que les condicions difereixen del cas de les rodes d'un automòbil, es pot extreure que si s'apliqués la condició de rotació a les rodes del model, s'obtindrien uns valors de drag i de lift menors.

El següent pas és definir els valors de referència que emprarà Fluent a l'anàlisi amb la opció Reference Values. A la taula 4.4 es mostren els valors utilitzats a cada camp.

Àrea frontal (m²)	Densitat (kg/m³)	Pressió (Pa)	Velocitat (m/s)	Viscositat (kg/m·s)
1,12238	1,225	0	50	1,7894e-05

Taula 4.4. Valors de referència considerats en l'estudi

En el cas d'anàlisis automobilístiques, es treballa només amb la projecció de l'àrea frontal, tant per calcular el drag com el lift. Els valors de la densitat i la viscositat de l'aire són els que per defecte estableix Fluent per a una temperatura de 25 °C. La velocitat és la mateixa que la fixada a les condicions de contorn. La pressió a 0 Pascals es refereix a la pressió atmosfèrica, ja que es treballa amb pressions relatives.

Les següents opcions (Solution Methods, Solution Controls, Monitors, Solution Initialization) tracten de diferents factors i esquemes a escollir per fixar com arriba Fluent a la solució. Es treballa amb el Solver Coupled, ja que és el que dona menys problemes per arribar a la convergència. El procés pot variar en cada anàlisi, però la base en tots els casos és fer una inicialització híbrida, la qual efectua 10 primeres iteracions senzilles emprant mètodes d'interpolació per ajudar a Fluent a iniciar els càlculs i poder arribar a la convergència més fàcilment. A continuació, es fan les primeres 100 iteracions fixant a primer ordre la discretització de les equacions diferencials parcials que emprà Fluent i es disminueixen els factors de relaxació per la quantitat de moviment, la pressió, l'energia cinètica turbulenta, el rati de dissipació turbulent i la viscositat turbulenta. D'aquesta manera, es facilita el desenvolupament del flux al voltant del vehicle en les primeres iteracions i s'evita així que es doni la divergència dels resultats. Un cop fetes les primeres 100 iteracions, es fixa a segon ordre la discretització i es tornen a augmentar els factors de relaxació per l'energia cinètica turbulenta, el rati de dissipació turbulent i la viscositat turbulenta, per aconseguir ara resultats més exactes. A monitors, s'ajusta la convergència perquè aquesta es doni quan els residuals dels diferents factors (continuitat, velocitat, k , ϵ) arribin a 0,001.

Un cop s'ha arribat a la solució i s'ha comprovat que aquesta és correcta, es pot procedir a estudiar els resultats. El mateix programari Fluent disposa de diferents opcions per visualitzar-



los, molt útil per estudiar qualitativament com es comporta el flux a les diferents zones del vehicles. També es poden emprar els reports per estudiar quantitativament les forces i moments generats, així com ubicar el centre de pressions. En el següent apartat es mostra els diferents resultats obtinguts en aquest primer estudi del model de sèrie.

4.3. Visualització i discussió dels resultats

Abans de procedir a visualitzar els resultats, cal remarcar que, tot i que s'ha assegurat que la solució trobada per Fluent és correcta, aquesta pot no correspondre's amb la que es donaria a la realitat, degut a les diferents simplificacions, tant geomètriques com de condicions de contorn, que s'han dut a terme, o degut també a possibles errors en el mallat. Per tant, alhora que s'estudien els resultats obtinguts i es visualitza el comportament del flux en les diferents parts de l'automòbil, és necessari dur a terme una comparació amb el comportament real que s'espera del flux a partir de la teoria i de les dades d'altres fonts d'anàlisis efectuades a vehicles de geometria semblant emprant CFD amb un model més exacte o a partir de l'estudi en un túnel de vent. Aquesta comparativa permet assegurar que els resultats, tot i no tenir una elevada exactitud, són igualment acurats i s'obtenen valors fidedignes amb els que caldria esperar a la realitat. Cal remarcar que la cerca d'informació en aquesta matèria es difícil, donada la confidencialitat dels resultats per part de les marques i enginyeries per assegurar la competència. Per tant, la majoria de comparatives s'hauran de basar en gràfics i conjunts de dades de vehicles en general.

A la taula 4.5 es mostren els valors obtinguts en aquesta primera anàlisi. Tant els valors mostrats com la visualització dels resultats corresponen al mallat amb més resolució. Les forces mostrades són les corresponents a les generades al model complet. Donat que només s'ha analitzat una meitat del model, hauran de multiplicar-se per dos els valors subministrats per Fluent, donat que l'àrea frontal serà el doble, mentre que els coeficients aerodinàmics romanen amb el mateix valor, donada la simetria del model. L'àrea frontal total és de 2,244 m².

	C_D	C_L	$C_D \cdot A_f$	$C_L \cdot A_f$	Drag (N)	Lift (N)
Pressió	0,2961	0,0995	0,6644	0,2233	1017,72	342,08
Viscositat	0,0268	0,0012	0,0601	0,0027	92,06	4,28
Total	0,3229	0,1007	0,7246	0,2260	1109,78	346,36

Taula 4.5. Resultats de les forces aerodinàmiques obtinguts amb Fluent

Pel que fa al C_D , el valor obtingut es troba dins de l'interval de coeficients assolits pels automòbils de turisme europeus actuals ($0,25 < C_D < 0,45$) [4]. Tot i les simplificacions que s'han portat a terme, el drag generat és versemblant respecte als valors que caldria esperar..

S'han separat les forces degudes a la diferència de pressions de les provocades per la fricció del fluid amb la superfície del vehicle. Es comprova que els resultats es corresponen amb el resultat teòric mostrat a l'apartat 3.3, on es demostra que els efectes provocats per la diferència de pressions són molt més significatius enfront als provocats per la fricció en el valor de drag total. En el cas del model emprat, el C_D degut a la viscositat del fluid representa un 8,3% del total. Aquest resultat es correspon al càlcul teòric considerant la part inferior del vehicle plana, com és el cas del model emprat, on s'obtenia que el C_D viscos representa un 10% del total.

Pel cas del C_L , el seu valor pels automòbils de turisme europeus actuals se situa a l'interval $0 < C_L < 0,2$ [5]. Es verifica, com en el cas del C_D , que el valor obtingut pel cas del lift es correspon amb els valors que cal esperar en aquest tipus de vehicle.

A més d'obtenir les forces i els coeficients aerodinàmics, cal ubicar el centre de pressions per saber on s'apliquen el drag i el lift resultants. Fluent disposa d'una opció que permet trobar la posició del centre de pressions a partir d'una de les coordenades ja coneguda. Al treballar amb la meitat del model, se sap que el centre de pressions es troba al pla de simetria (symmP), format pels eixos Y i Z. Tot i ser aquesta condició correcta, a l'imposar la coordenada X a 0 i al calcular els altres dos valors, s'obté la coordenada Y correcta però no la de Z. Per trobar la coordenada Z correcta s'ha d'imposar ara que el valor conegut és el de Y, ja que aquest sí que



és el real, i calcular la posició X i Z del centre de pressions. En aquest cas, s'obté una coordenada X molt petita, de l'orde de 10^{-7} , la qual es pot aproximar a 0, i la coordenada Z obtinguda en aquest cas serà la correcta. Aquest és el procediment a seguir en tots els casos per calcular el centre de pressions. A la figura 4.7 es mostra la seva posició i la del centre de masses del model. En apartats posterior es discutirà els efectes que té la posició relativa del centre de pressions respecte al centre de masses en l'estabilitat del vehicle.

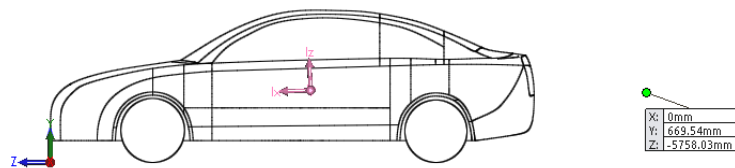


Fig. 4.7. Posició del centre de pressions respecte a l'origen de coordenades

Abans d'estudiar el comportament del flux en zones específiques, és útil visualitzar el seu comportament general al voltant de tot el vehicle. A continuació, es mostra la distribució de pressions i de línies de corrent en un pla format per les direccions Z-Y i separat pocs mil·límetres del pla de simetria SymmP. Es recomana procedir d'aquesta manera, ja que la visualització directa en el pla SymmP no és acurada, degut a que es poden donar discontinuïtats en el flux degut a les condicions de contorn especificades en aquesta paret.

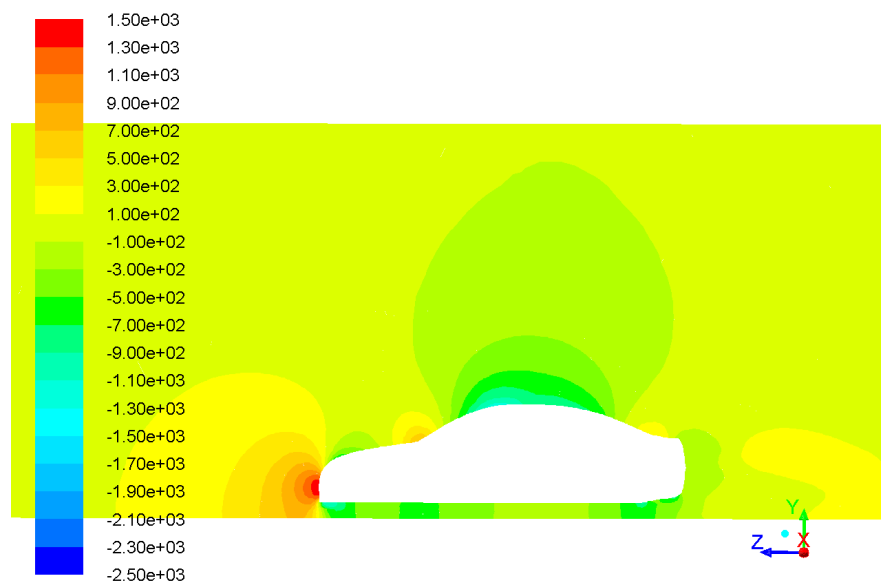


Fig. 4.8. Distribució de pressions. Unitats: Pa

S'observa que els resultats obtinguts es corresponen amb el comportament teòric vist a l'apartat 3. En la distribució de pressions obtinguda (figura 4.8) es distingeixen, a partir de l'escala de colors, el punt d'estancament de la part frontal, corresponent a la zona vermella d'altres pressions i velocitats baixes, el segon punt d'estancament a la unió del capo amb el parabrises, en aquest cas corresponent a la zona taronja-groga, formada per pressions no tant altes, ja que la velocitat no decau tant com en el primer punt, i la zona de mínima pressió i màxima velocitat, representada en blau-verd, i posterior desacceleració i augment de pressió al baixar cap a la zona posterior. Degut a que es tracta d'una anàlisi amb fluid real, es produeix la separació de la capa límit a la part posterior, amb la conseqüent generació d'una estela formada per velocitats i pressions baixes, representada en tons verds. S'observa també com la pressió del flux per la part inferior del vehicle disminueix a la part davantera, donat que el flux s'accelera, i com aquest es troba amb l'estela a la part posterior. El recorregut central és més incert, ja que es té la interacció amb les rodes i és necessari efectuar altres visualitzacions per veure com es comporta el flux en aquesta zona.

A partir del diagrama de distribució de les línies de corrent (figura 4.9) s'observa més clarament la formació d'una estela a la part posterior del vehicle formada per vòrtexs que provoquen la recirculació del flux. S'observa també l'abast de l'alteració de les línies de corrent degut a l'obstacle que representa el vehicle.

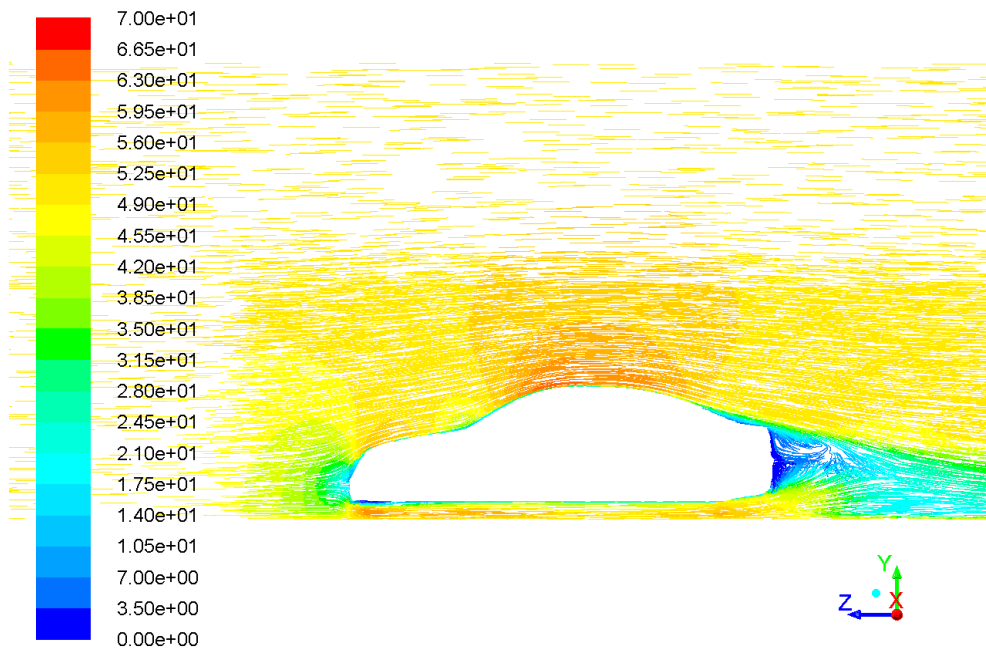


Fig. 4.9. Distribució de les línies de corrent visualitzades segons la seva velocitat. Unitats: m/s



Un cop visualitzat el comportament del flux al voltant del vehicle des d'un punt de vista general, es pot procedir a avaluar la seva interacció local a diferents zones del vehicle, tant per comprovar que el seu comportament es correspon amb la realitat com per tenir una referència a les zones on s'incorporaran millores aerodinàmiques i així poder fer una comparativa posteriorment.

Una primera zona a visualitzar és la part frontal del vehicle, on es dona la primera interacció amb el flux d'aire (figura 4.10).

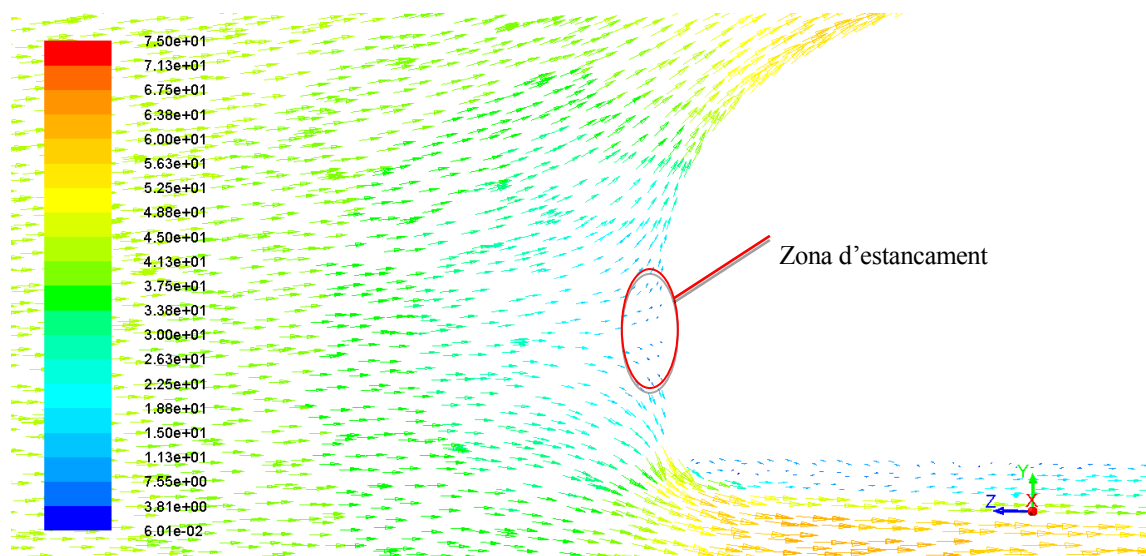


Fig. 4.10. Distribució de velocitats a la part davantera. Unitats: m/s

A partir de la representació de vectors, els quals indiquen la direcció d'avanç del flux i la seva velocitat, es pot observar més detalladament la zona d'estancament i com el flux es bifurca cap a la part superior i inferior del vehicle, a més de cap als laterals. Es posa de manifest també l'acceleració que pateix el flux a mesura que es desplaça cap a la part superior i inferior, on es dona una reducció de l'àrea transversal.

Seguint el recorregut del flux per la part superior, es té el següent punt d'estancament a la unió del capó amb el parabrises (figura 4.11). Tot i que no es genera cap vòrtex, com cauria esperar en un model real, donat a que el pas del capó al parabrises es fa de forma abrupta, a diferència del model emprat, on degut a les simplificacions efectuades aquesta unió sí es dona de forma suau, sí es té una reducció de velocitats degut al canvi de pendent que suposa el pas del capó al parabrises, i es produeix el conseqüent augment de pressions a la zona i de drag total generat.

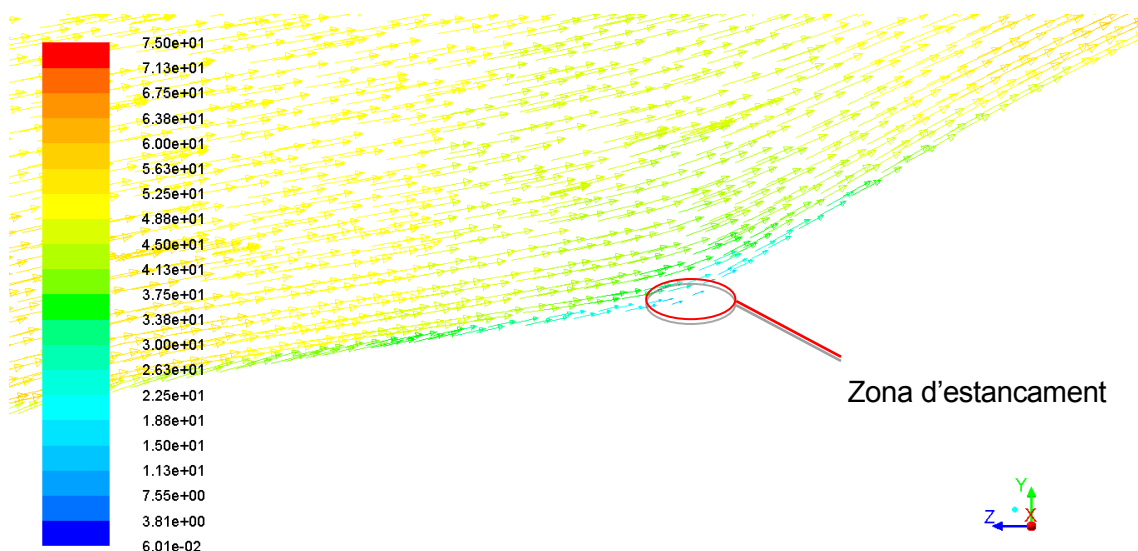


Fig. 4.11. Distribució de velocitats a la unió del capó amb el parabrises. Unitats: m/s

La següent zona a visualitzar és la part posterior del vehicle, on el flux ha arribat al seu punt de màxima velocitat al sostre i comença a desaccelerar. Aquesta zona és crítica per la capa límit, degut a la possibilitat de que aquesta se separi del vehicle al no poder vèncer el gradient de pressions advers que es presenta. Com s'observa a la figura 4.12, tot i que el flux ha perdut velocitat, no s'observa cap vector en direcció contrària a la capa límit, fet que indicaria que s'ha produït la separació. El flux roman en contacte amb la superfície del vehicle fins que aquesta acaba sobtadament a la part posterior.

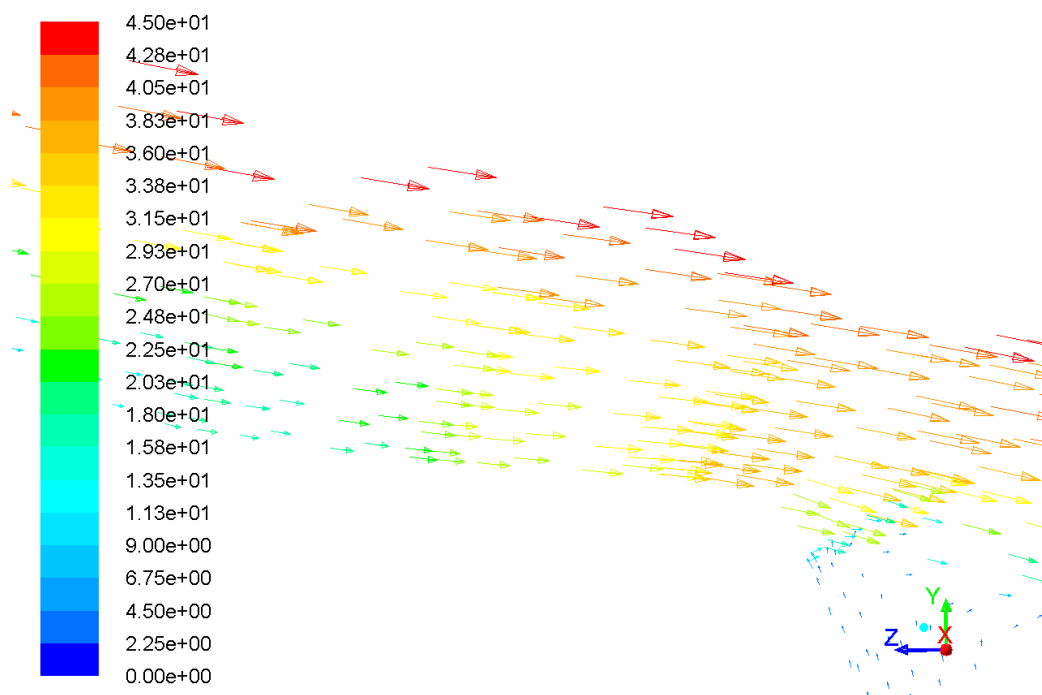


Fig. 4.12. Distribució de velocitats de la capa límit a la part posterior del vehicle. Unitats: m/s



Per últim, es té la zona posterior del vehicle, on el flux se separa de la seva superfície degut al canvia abrupte a l'arribar a la part final. Es aquí on es forma una estela composta per vòrtexs que provocaran la recirculació del flux amb la corresponent generació de drag (figura 4.13).

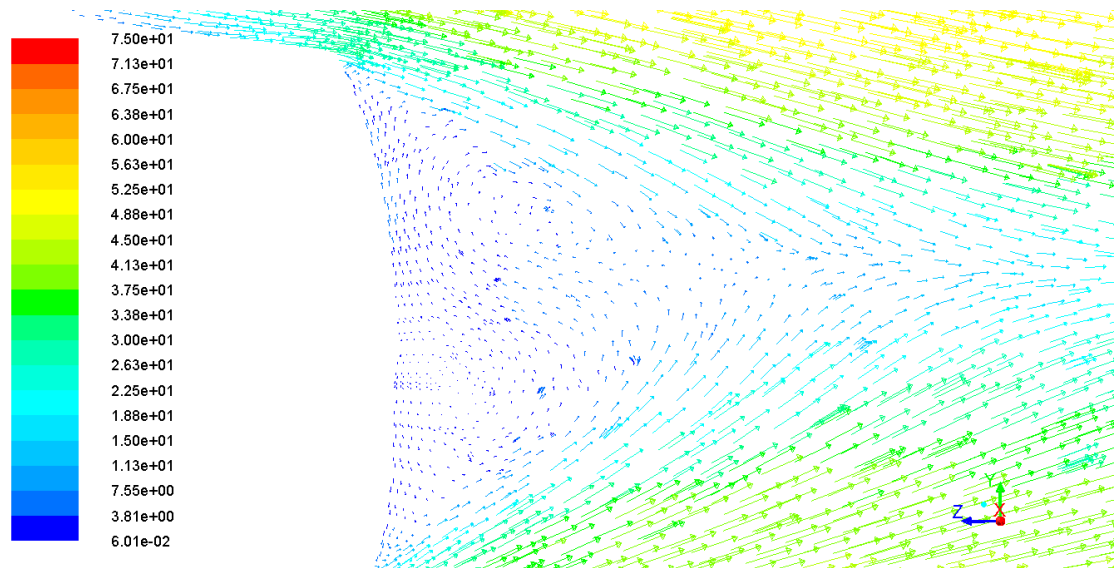


Fig. 4.13. Visualització de l'estela formada a la part posterior del vehicle. Unitats: m/s

Un cop analitzat el comportament del flux a les diverses zones d'interès de la part superior, s'estudien a continuació les zones d'interès amb les que es troba el flux a la part inferior. La primera part es troba a la part davantera del vehicle a la zona del para-xocs, just quan el flux s'introdueix per la part inferior.

A diferència de la part superior, on el flux es capaç de recórrer el capó sense separar-se de la seva superfície, no passa el mateix a la part inferior, degut a que la part davantera del vehicle on impacta l'aire i la superfície inferior formen un angle d'aproximadament 90° , fent que la geometria sigui semblant a una placa plana perpendicular a l'avanç del flux. Això provoca que inicialment el flux no sigui capaç de romandre adherit a la superfície i que se separi, formant un petit vòrtex que generarà recirculacions (figura 4.14, detallada 4.15) i fent que el flux no es torni a adherir fins corrent avall.

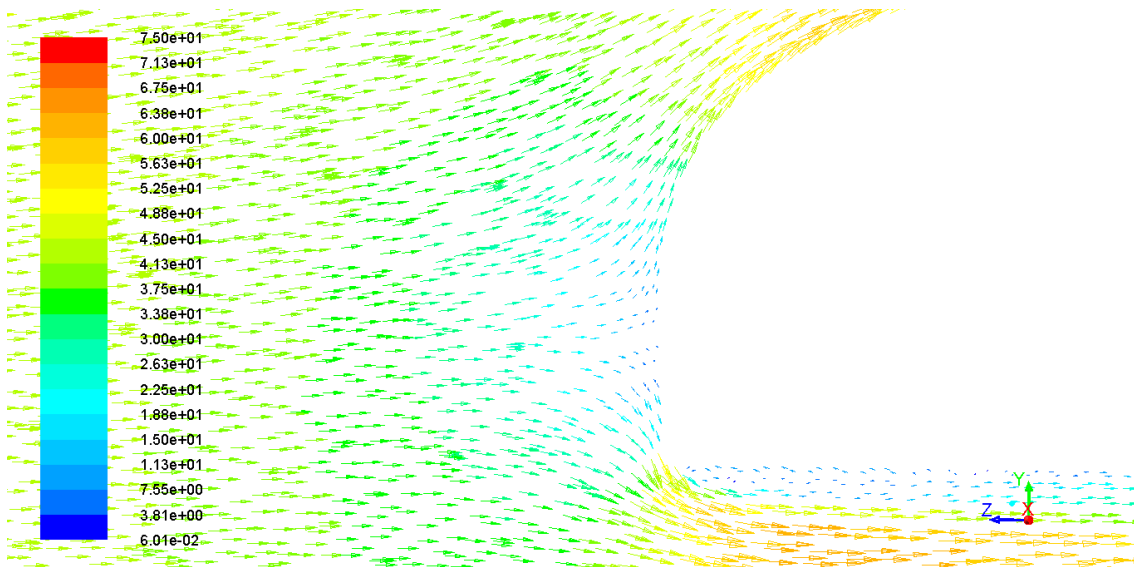


Fig. 4.14. Distribució de velocitats a la part davantera inferior del vehicle. Unitats: m/s

Tot i que la distància entre la superfície inferior del vehicle i el terra es manté constant, donat que es treballa amb la simplificació de fons pla, fins a la part final del vehicle, on aquesta augmenta, l'aire interacciona amb les rodes i amb l'aire dels laterals del vehicle, fent que la seva velocitat i pressió no es mantinguin constants durant aquest trajecte. A la figura 4.16 es mostra la distribució de pressions en un pla paral·lel al mateix pla de visualització anterior però a la profunditat de les rodes.

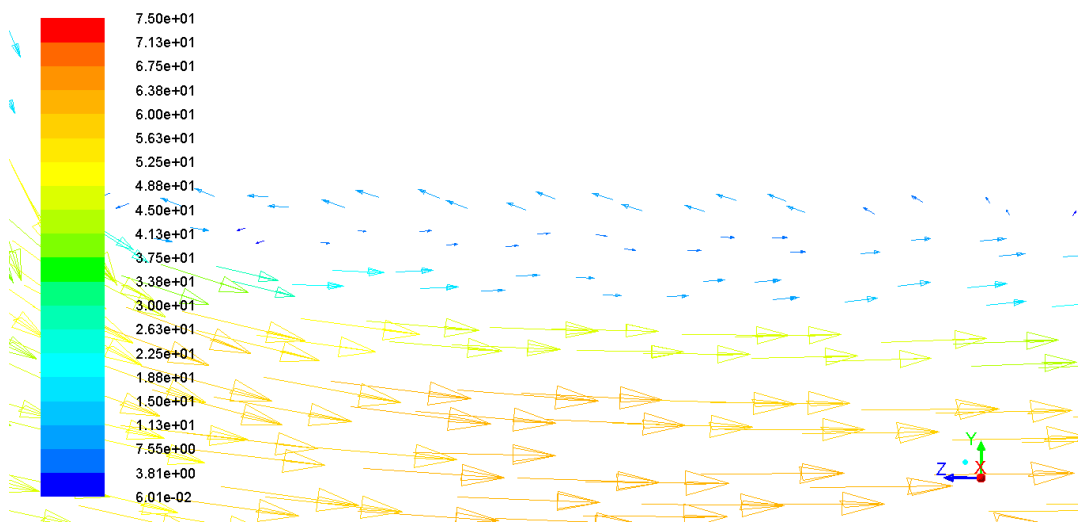


Fig. 4.15. Detall del petit vòrtex creat a la part davantera inferior del vehicle. Unitats: m/s



S'observa que en ambdues rodes es té un punt d'estancament a la part davantera, més gran en el cas de la roda anterior, ja que és la primera a rebre el flux d'aire. Aquesta redueix l'àrea transversal d'avanç de l'aire per la part inferior i crea una primera zona de depressions al seu darrera. El flux continua avançant i la seva pressió va augmentant a mesura que es torna a expandir fins que arriba a la roda posterior, on es produeix el mateix efecte, amb menor magnitud, i el flux acaba abandonant el vehicle.



Fig. 4.16. Distribució de pressions a les rodes. Unitats: Pa

S'ha de tenir en compte també els remolins marginals que es formen degut a que l'aire de la part inferior intenta anar cap als laterals del vehicle, on es tenen pressions menors, produint drag addicional. Aquest fenomen es pot observar a la figura 4.17, on es mostra la distribució de velocitats del flux en un pla perpendicular al seu avanç, ubicat aproximadament a la part central del vehicle. A la figura 4.18 es mostra la vorticitat del flux en el mateix pla. S'observa una zona blau clara a la part inferior del cotxe que mostra la generació d'un remoli que fa que el flux tendeixi a escapar cap als laterals. S'observa també el valor màxim de vorticitat a la zona vermella, la qual arriba als 500 s^{-1} .

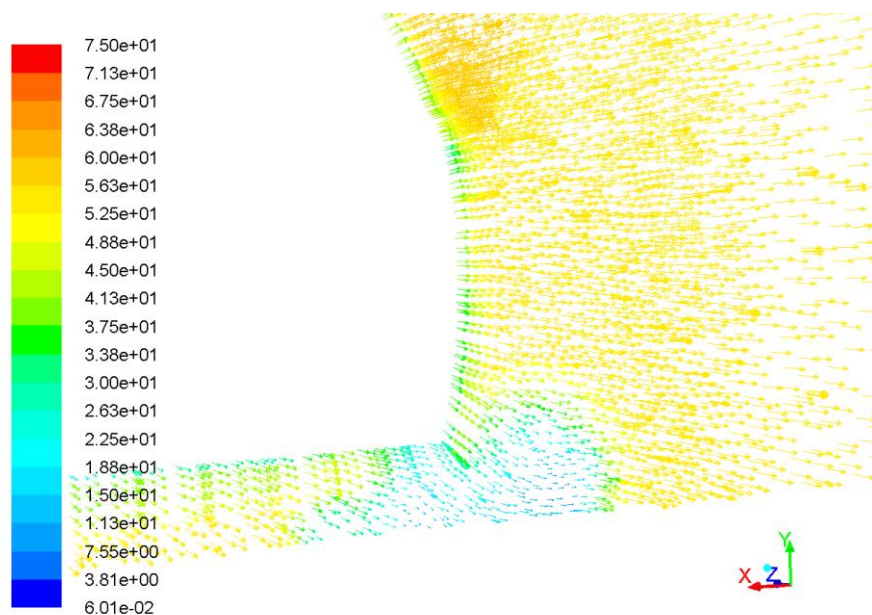


Fig. 4.17. Remoli format per la diferència de pressió entre la part inferior del vehicle i els laterals. Unitats: m/s

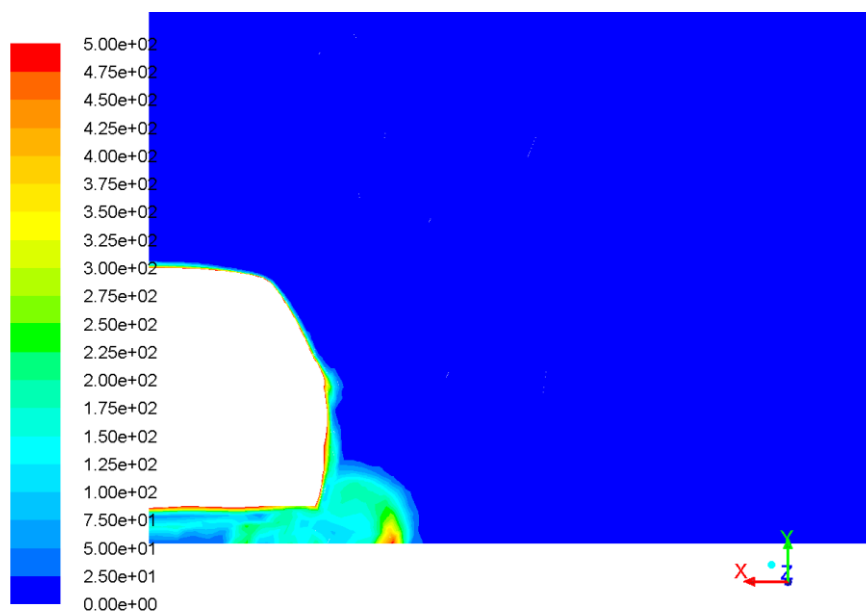


Fig. 4.18. Vorticitat de l'aire al pla perpendicular al flux. Unitats: s^{-1}

4.4. Estudi dinàmic del model

A partir de les diferents visualitzacions obtingudes mitjançant el programari Fluent, s'ha pogut fer un estudi qualitatiu del comportament del flux al llarg del vehicle. Aquest estudi ha permès tant validar el model, comparant els resultats amb els conceptes teòrics i amb altres



estudis de característiques semblants, com obtenir el comportament del flux al llarg del vehicle per poder fer un estudi comparatiu posterior a l'afegir les diferents millores aerodinàmiques. Tot i això, aquest estudi es limita a determinar la velocitat i pressió que té el flux en una posició donada i a obtenir les forces de drag i de lift, i pot ser útil per saber quines zones són més crítiques i més sensibles a modificar aquestes forces a partir d'afegir modificacions al seu voltant, però és convenient fer un estudi complementari de les forces que actuen sobre el vehicle del vehicle per saber com es comportarà quan aquest estigui en un circuit competint.

A la figura 4.19 es mostra el vehicle amb les diferents forces que actuen a sobre seu. Donat que només es tenen forces al pla YZ, es pot fer el càlcul de les forces i moments bidimensional. Les forces que s'oposen a l'avanç d'un automòbil quan aquest està circulant són tres: la força deguda a una pendent, la força de resistència al rodolament i la força aerodinàmica. Donat que aquesta última depèn de la velocitat al quadrat i simplificant que el vehicle circula en pla, es pot considerar que tota la força resistent correspon a la força aerodinàmica produïda a altes velocitats (per sobre dels 100 km/h).

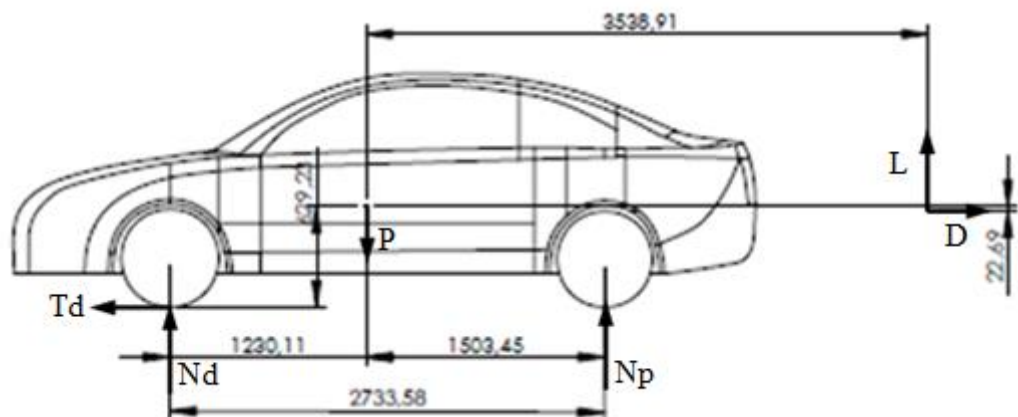


Fig. 4.19. Forces que actuen sobre el vehicle quan aquest està circulant

A continuació, s'enllista què representa cadascuna de les forces:

- N_D i N_P : representen les forces normals que fa el terra sobre cada eix. S'ha emprat el model bicicleta, que correspon a treballar amb la suma total de les forces aplicades a cada una de les dues rodes ubicades a l'eix davanter i posterior. Així, se

sap la força total que pateix cadascun dels eixos però no se sap quina contribució té cada roda (roda esquerra o dreta), ja que el model es simplifica a només una roda a cada eix, com en el cas d'una bicicleta. Aquest fet no deriva en cap impediment pel càlcul efectuat, ja que és suficient saber la força total sobre cada eix.

- T_D : correspon a la força de tracció que generen les rodes de l'eix motriu sobre el terra i és la que permet fer avançar el vehicle i, en aquest cas, oposar-se a la força de drag. A la taula de l'annex B s'especifica que el vehicle és de tracció davantera.
- P : és la força deguda al pes del vehicle. S'ha treballat amb la massa especificada a la taula de l'annex B.
- L i D : són les forces aerodinàmiques aplicades al centre de pressions, explicades a l'apartat 3.1. Donat que es fa el càlcul amb el model sencer, es treballen amb les forces de drag i lift totals de la taula 4.5.

Per trobar la posició del centre de masses, es pot emprar el mateix programari SolidWorks. Tot i això, tal i com s'ha explicat a l'apartat 4.1, es considera el model com un sòlid homogeni. En aquest cas, s'obté una posició del centre de masses gens fidedigne amb la posició real que cal esperar en el tipus de vehicle que s'està estudiant. Per treballar amb un valor més realista, s'ha agafat la coordenada Y que proporciona SolidWorks, ja que el seu valor és consistent amb el que s'obté en aquests tipus de vehicles, però la coordenada Z s'ha fixat per tal de que el repartiment de masses quedi un 55% a l'eix davanter i un 45% a l'eix posterior, valor típic en aquest tipus de vehicle, ja que el motor està situat a la part davantera i el centre és buit per albergar els passatgers.

A continuació, es mostra el càlcul efectuat per saber la distribució de forces normals. El càlcul de T_P és directe, ja que és l'única força que es pot oposar al drag. Els valors importants són els de N_D i N_P . Se sap el lift total que patirà el vehicle, però depenent de la posició del centre de pressions el lift actuarà més en un eix que en l'altre. En el càlcul efectuat es posa de manifest la importància de la ubicació del centre de pressions.



Dades:

$$m = 1454 \text{ kg}$$

$$v = 50 \text{ m/s}$$

$$D = 1109,78 \text{ N}$$

$$L = 346,36 \text{ N}$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

Vehicle estàtic:

$$\Sigma F_y = 0 \quad N_D + N_P = mg$$

$$\Sigma M_{CG} = 0 \quad N_D \cdot 1230,11 = N_P \cdot 1503,46$$

$$N_D = 7845,04 \text{ N} \quad N_P = 6418,7 \text{ N}$$

Vehicle en moviment:

$$\Sigma F_x = 0 \quad T_D = D = 1109,78 \text{ N}$$

$$\Sigma F_y = 0 \quad P = mg = N_d + N_p + L$$

$$\Sigma M_{CG} = 0 \quad N_D \cdot 1230,11 + T_D \cdot 692,23 = D \cdot 22,69 + N_P \cdot 1503,46 + L \cdot 3538,91$$

$$N_D = 7831,13 \text{ N} \quad N_P = 6086,25 \text{ N}$$

$$\Delta N_D = -13,91 \text{ N}$$

$$\Delta N_P = -332,45 \text{ N}$$

A la taula 4.6 es mostren els resultats obtingut, fent una comparativa del cas estàtic respecte al cas del vehicle en moviment.

	N estàtic (N)	N en moviment(N)	ΔN (N)	% ΔN	C_L
Eix davanter	7845,04	7831,13	-13,91	-0,18	0,004
Eix posterior	6418,7	6086,25	-332,45	-5,18	0,0968

Taula 4.6. Resultats del càlcul de les forces normals quan el vehicle es troba circulant

S'observa que l'eix posterior és on s'aplica la major part del lift (91,4%). A altes velocitats, en els vehicles comercials, es pot arribar a generar un lift a l'eix posterior d'entre 200 i 400 N a 180 km/h per a un automòbil amb un C_L posterior d'aproximadament 0,1[6], amb una reducció màxima del 10% de la força normal en estàtic. La descompensació entre les forces normals de l'eix davanter i l'eix posterior afecten a l'estabilitat del vehicle de diverses maneres. Per una banda, la pèrdua de força normal a l'eix posterior redueix l'adherència dels pneumàtics. Si aquests són motrius, la tracció que es pot aplicar al terra serà menor. També afecta als primers moments de la frenada a alta velocitat, quan la velocitat encara és alta, ja que la força normal total dels eixos serà menor i, per tant, es redueix la força màxima de frenada que pot generar el vehicle.



Un altre efecte important es dóna quan el vehicle està girant i existeix una descompensació de forces normals entre els eixos. Si es té menys força normal a l'eix davanter, el vehicle pot patir subviratge, el qual es dóna quan el vehicle gira menys que l'imposat pel volant. Si, pel contrari, és l'eix posterior el que té menys força normal, el vehicle pot patir sobreviratge, que es dóna quan el vehicle gira més del que el conductor vol.

A la figura 4.20 s'observa com l'increment de força normal a les rodes degut al downforce permet millorar el rendiment del vehicle a les corbes. Si es considera que la càrrega vertical aplicada a la roda és de 200 kg, a partir del gràfic s'extreu que la màxima força lateral que es pot generar a la roda abans d'arribar a la zona de lliscament és d'aproximadament 150 kg per un slip angle de 4° (punt A). Si, a partir de la generació de downforce, s'augmenta la càrrega fins als 300 kg, s'aconsegueix generar la mateixa força lateral amb un slip angle menor (punt B), fet que redueix el desgast i l'escalfament dels pneumàtics. Altrament, es pot agafar la corba a una major velocitat sense perill d'arribar a la zona de lliscament (punt C). El mateix passa per l'acceleració i per la frenada a altes velocitats donat que, pel cas extrem, $T = \mu \cdot N$.

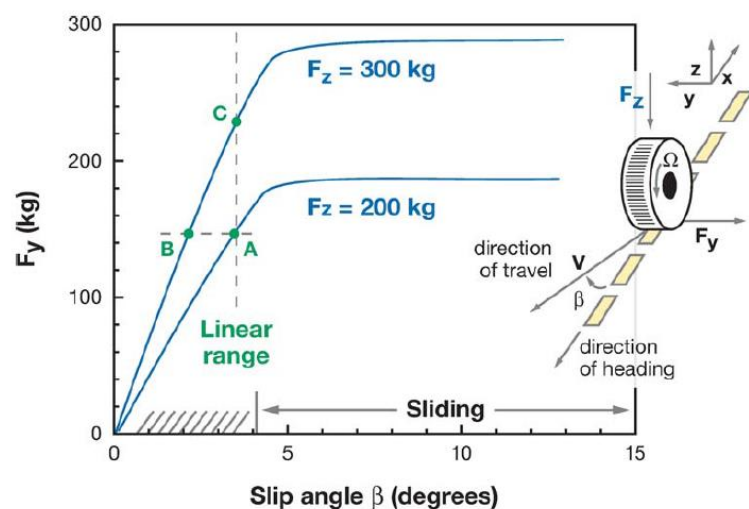


Fig. 4.20. Força lateral que pot generar un neumàtic dependent del seu angle de deriva i força normal

5. Elements aerodinàmics en automòbils

Un cop feta una primera anàlisi del comportament aerodinàmic de l'automòbil de sèrie, es pot començar a dissenyar els elements aerodinàmics que han de permetre aconseguir un millor rendiment a l'hora de la competició. Per poder treure el màxim profit i saber configurar òptimament els diferents elements a afegir, s'ha d'entendre de quina manera alteren el flux d'aire i quins avantatges i inconvenients introdueixen. D'aquesta manera, es descriuran els diferents elements aerodinàmics que es poden afegir a un automòbil, detallant els seus principis de funcionament i com afecten al flux d'aire, i es faran les pertinents anàlisis amb els elements incorporats per poder fer una comparativa amb l'anàlisi del model de sèrie efectuat a l'apartat 4.2. L'estratègia a seguir és seguir l'orde que segueix el flux d'aire i anar analitzant cada zona per separat, des de la part davantera fins la posterior. Així, qualsevol modificació afectarà el flux corrent avall, mentre que el flux corrent amunt romandrà igual. Totes les anàlisis amb les diferents millores s'han dut a terme seguint el mateix procediment que en el model de sèrie amb el mallat de major resolució, tal i com s'explica a l'apartat 4.2.

5.1. Spoiler davanter

La primera zona d'importància és la part davantera del cotxe, quan el flux es troba amb el seu primer punt d'estancament i es divideix cap a la part superior i inferior del cotxe, així com cap als laterals. Les possibles modificacions que es puguin fer del flux en aquesta zona són de gran importància, ja que el flux que es rep encara no ha estat modificat, i la manera com s'alteri repercutirà en tot el vehicle. Els efectes que es poden aconseguir amb un spoiler davanter són la reducció de drag i la disminució de lift a l'eix frontal de les rodes. La reducció de drag és deguda a que s'aconsegueix disminuir la quantitat d'aire que circula per la part inferior del vehicle, fent que el drag generat pels obstacles de la part inferior sigui menor. Alhora, l'aire circularà en major quantitat per la part superior i pels laterals [7]. A l'apartat 3.4 s'ha demostrat la importància del drag generat per la part inferior del vehicle i com varien els resultats entre considerar aquesta zona llisa i plana o rugosa amb obstacles. Degut a les simplificacions que s'han portat a terme en el model emprat, es treballa amb una superfície inferior plana. Per tant, s'haurà de tenir en compte que els resultats que s'obtinguin no contemplaran una reducció de drag tant significativa, ja que l'únic obstacle que el flux es



troba a la part inferior són les rodes. S'ha de tenir en compte també que un spoiler davanter intrínsecament origina drag, degut a que fa augmentar la superfície d'estancament. D'aquesta manera, es pot combinar la reducció de drag a la zona inferior del vehicle amb els seu augment degut a la superfície d'estancament extra del propi spoiler. A mesura que l'àrea frontal de l'spoiler es fa més gran, s'aconsegueix reduir el drag de la part inferior del vehicle, ja que al circular menys aire el drag generat serà menor, mentre que aquest augmentarà a la part frontal, ja que la zona d'estancament es fa més gran degut a l'spoiler, i viceversa. Per tant, es té un punt mínim que dependrà de l'altura de l'spoiler o, el que és el mateix, de la separació entre la part inferior de l'spoiler i el terra.

La reducció de lift a l'eix frontal es produeix degut a la disminució de la pressió a la part inferior davantera. Aquesta es produeix degut a que l'spoiler produeix una estela al seu darrera semblant a la que es produeix a la part posterior del vehicle, formada per aire amb baixes pressions i velocitats. L'aire que circula per sota l'spoiler ho fa a través d'una superfície transversal molt petita que augmenta abruptament quan l'aire abandona l'spoiler davanter, produint un gradient de pressions advers elevat que fa que aquest se separi de la superfície inferior del cotxe, tal i com s'observa a la figura 5.1. Aquesta disminució de pressió a la part inferior produeix més força negativa a la part davantera, reduint el lift o, fins i tot, generant downforce. Contràriament, l'eix posterior presenta un augment del lift, degut a que el caudal d'aire a la part superior ha augmentat al disminuir el de la part inferior, fent que la velocitat en aquesta regió sigui més elevada i que, per tant, el lift generat augmenti. Tot i això, la reducció de lift a la part inferior davantera és més significativa, fent que les rodes de l'eix davanter s'enganxin més a terra, a diferència de l'eix posterior, on sí es produirà un augment del lift total. A diferència del drag, la reducció del lift no té cap límit, i només està limitada per la mínima distància que pugui tenir l'spoiler respecte al terra sense que aquest entri en contacte amb cap obstacle mentre es condueix.

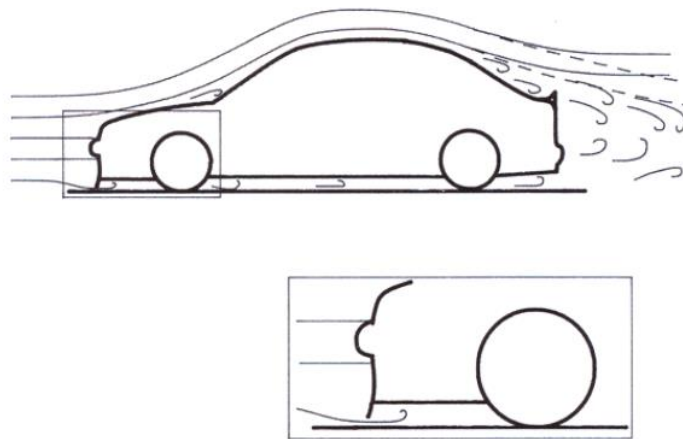


Fig. 5.1. Funcionament d'un spoiler davanter

El model que s'ha utilitzat és el d'un spoiler format per dues parts (figura 5.2): una perpendicular al flux de l'aire encarregada d'impedir que aquest circuli per la part inferior del vehicle, anomenada air dam, d'alçada 130 mm, i una altra paral·lela al terra i unida a la part inferior de l'air dam, anomenada front splitter, de longitud màxima 120 mm, encarregada de generar downforce a partir de la diferència de pressions entre el punt d'estancament generat a l'air dam i la part inferior del front splitter, on el flux s'accelera i es tenen depressions. Addicionalment, amb el front splitter també s'aconsegueix que circuli menys aire per la part inferior del vehicle.

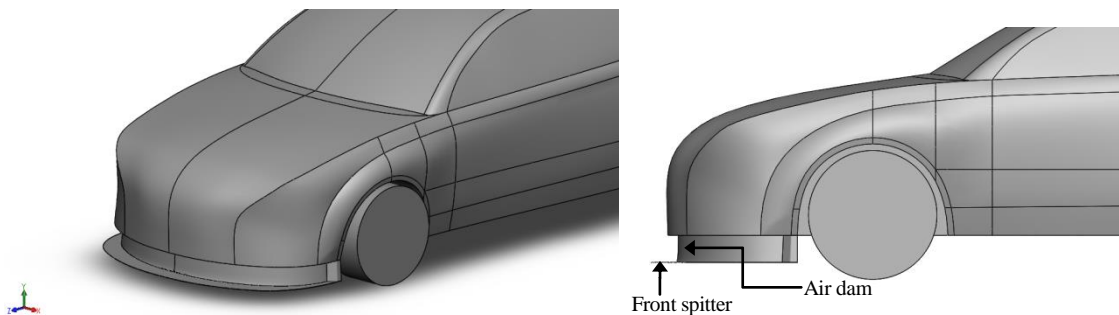


Fig. 5.2. Disseny del front spoiler emprat en el model

A la taula 5.1 es mostren els resultats obtinguts amb aquesta primera millora aerodinàmica. Donat que ja s'ha demostrat que la forma del vehicle és el factor principal que determina les forces aerodinàmiques que es generen enfront del factor fricció, es mostren a les taules directament els resultats totals del model complet. La nova àrea frontal amb l'spoiler davanter és de 2,42 m².



C_D	C_L	$C_D \cdot A_f$	$C_D \cdot A_f$	Drag (N)	Lift (N)
0,3196	0,0678	0,7734	0,1641	1184,76	251,32

Taula 5.1. Coeficients aerodinàmics obtinguts amb la millora del front spoiler

S'observa que el c_d ha disminuït respecte a l'obtingut amb el model de sèrie ($c_d=0,3229$) però alhora també ha augmentat l'àrea frontal amb l'addició de l'spoiler frontal ($\Delta A_f=0,176 \text{ m}^2$). Per poder fer una comparació correcta s'empra el valor de $C_D \cdot A_f$. En aquest cas, el valor ha augmentat 0,0489 i, per tant, el drag generat serà major ($\Delta D=74,98 \text{ N}$). Es pot comprovar com ha augmentat el drag a la part davantera del vehicle alhora que ha disminuït el generat a la part inferior, desglossant el drag total en el produït a 3 zones diferents: el xassís, la roda davantera i la roda posterior. A la taula 5.2 es mostra l'aportació de drag de cada element pel model de sèrie i pel model amb spoiler davanter.

	Drag Xassís [N]	Drag roda davantera [N]	Drag roda posterior [N]	Drag total [N]
De sèrie	662	355,4	92,38	1089,78
Amb spoiler davanter	927,64	204,1	53,02	1184,76

Taula 5.2. Drag produït a diferents zones del vehicle amb i sense spoiler davanter

Caldria esperar que, emprant un model que contemples un fons irregular, l'augment de drag fos menor i, fins i tot, es podria aconseguir una disminució del drag total.

En el cas del lift, s'obté un valor de 251,32 N, amb una reducció respecte al model de sèrie de -95,04 N. S'ha de tenir en compte que, encara que a la zona davantera del vehicle es produeix downforce, augmentant la força normal a l'eix davanter, a l'eix posterior es produeix l'efecte contrari, fent que la reducció total de lift total no sigui elevada. A més, aquesta

descompensació provoca greus problemes de sobreviratge i per això és necessari complementar l'spoiler davanter amb un aleró a la part posterior que compensi el downforce generat a l'eix davanter, tal i com es veurà en el següent apartat.

Per quantificar la diferència de les forces normals entre eixos amb l'spoiler davanter, s'ha efectuat el mateix càlcul dinàmic que en el model de sèrie (apartat 4.4), però substituint-hi els nous valors. A la taula 5.3 es mostren els resultats.

	N estàtic (N)	N en moviment(N)	ΔN (N)	% ΔN	C_l
Eix davanter	7845,04	8614,55	769,51	9,81	-0,2077
Eix posterior	6418,7	5397,87	-1020,86	-15,9	0,2755

Taula 5.3. Resultats del càlcul de les forces normals pel model amb spoiler davanter

Amb els resultats numèrics s'observa amb més exactitud com l'elevada càrrega aerodinàmica generada a l'eix davanter es veu descompensada pel lift que es produeix a l'eix posterior. Aquests resultats també permeten comparar els valors obtinguts amb els calculats a partir d'un automòbil de carrer d'àrea frontal $2,32 \text{ m}^2$, que circula a una velocitat de 160 km/h i al que se li ha afegit un spoiler davanter de 90 mm , el qual produeix una reducció del C_L a l'eix davanter de $0,21$ [8]. Donat que les condicions d'estudi són semblants a les emprades al model, així com l'altura de l'spoiler, pot servir de referència per assegurar que els resultats obtinguts són correctes.

A la figura 5.3 es pot observar com el flux s'accelera al passar per sota l'spoiler i com aquest es desprèn a causa de l'elevat gradient de pressions amb que es troba al final del front spitter. L'estela que es genera a la part inferior ha augmentat respecte a la que s'obtenia en el model de sèrie i, conseqüentment, les depressions en aquesta zona es fan majors, fet que provoca la reducció de lift a l'eix davanter.



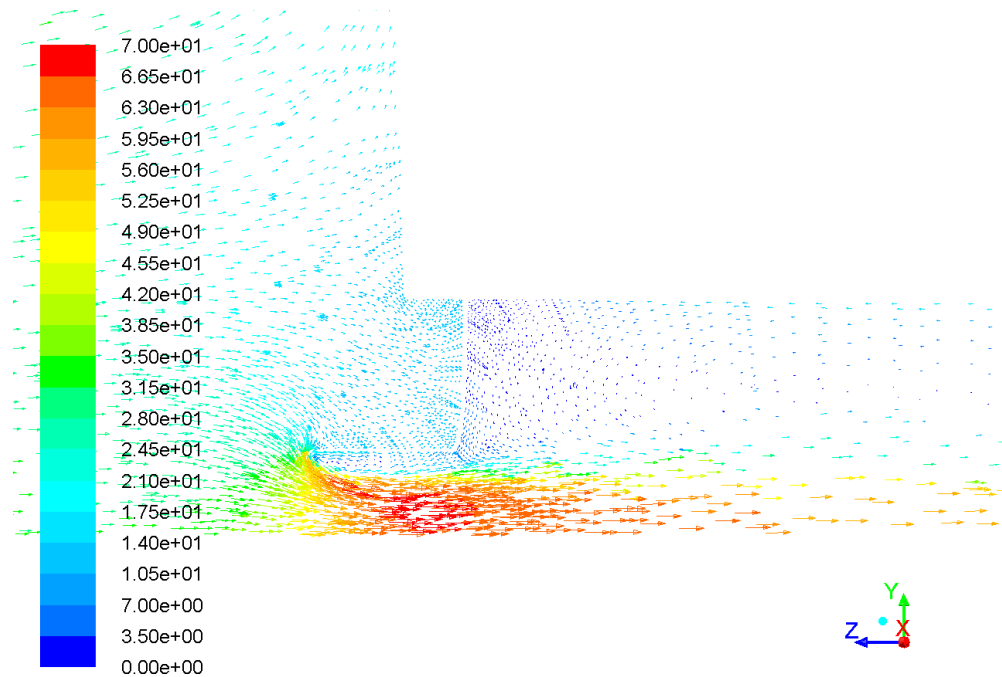


Fig. 5.3. Distribució de velocitats a la zona de l'spoiler davanter. Unitats: m/s

Per altra banda, a la figura 5.4 s'observa el funcionament del front spitter i com aquest ajuda a generar un major downforce a l'eix davanter. La diferència de pressions entre la part superior i la part inferior provoca una força negativa que contribueix a la disminució de lift a l'eix davanter. S'observa també com ha augmentat la zona d'estancament degut l'increment de l'àrea frontal.

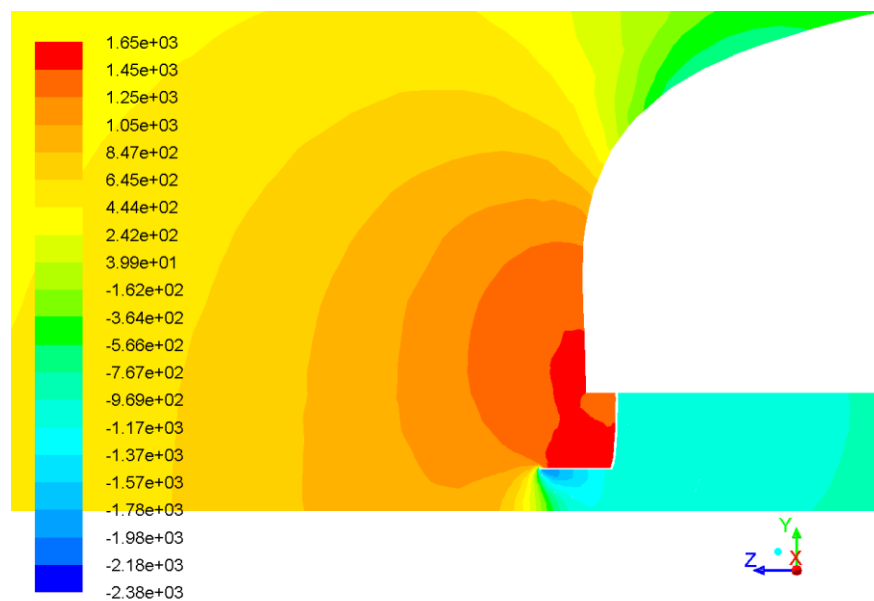


Fig. 5.4. Distribució de pressions a la zona de l'spoiler davanter. Unitats: Pa

5.2. Aleró posterior

Per tal d'equilibrar el downforce generat a la part davantera del vehicle per l'spoiler i, alhora, generar més càrrega aerodinàmica total, cal incorporar un nou element aerodinàmic a la part posterior del vehicle, just abans de que el flux abandoni l'automòbil. Per generar càrrega aerodinàmica en aquesta zona, s'utilitza l'apèndix aerodinàmic conegut com aleró. El seu funcionament és el mateix que en el cas d'un perfil alar emprat en l'aeronàutica, on la seva geometria fa que l'aire de la part superior (extradós) circuli més despres que en la part inferior (intradós), produint un gradient de pressions vertical positiu. Pel cas de l'automobilisme de competició, l'objectiu és crear una sustentació negativa que enganxi el vehicle a terra sense que això produeixi un drag elevat. Per a tal fi, es pot emprar el mateix perfil alar i invertir-lo per aconseguir l'efecte contrari. D'aquesta manera, es poden consultar els assajos que s'hagin fet sobre el perfil, tenint en compte que els valors de lift estaran en negatiu, mentre que els de drag continuaran sent els mateixos.

A la figura 5.5 es mostra un exemple de perfil d'aleró amb la terminologia que s'utilitza per referir-se a les diferents parts que el caracteritzen.

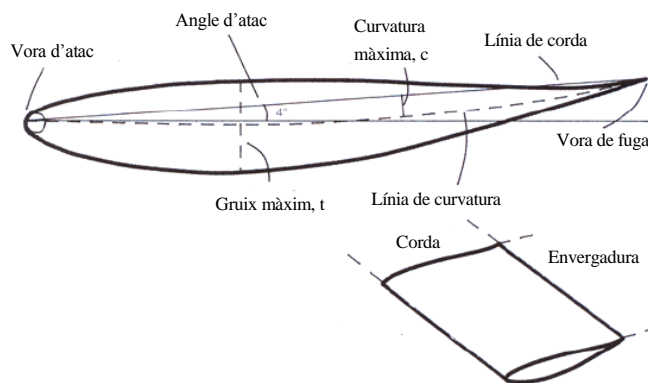


Fig. 5.5. Nomenclatura de les diferents parts d'un aleró

En el cas d'un perfil emprat en la competició automobilística, interessa un perfil asimètric amb una curvatura que faci que l'aire circuli més ràpidament per l'intradós per generar lift negatiu. La línia de curvatura es pot representar com una línia que passa per tots els punts mitjans del perfil. Així, es defineix la curvatura com la distància entre la línia de curvatura i la línia de corda, la qual connecta els punts de vora d'atac i vora de fuga en una línia recta. Per caracteritzar un perfil, s'acostuma a donar el gruix màxim en percentatge de la dimensió de la



corda, c , i la seva posició expressada també com a percentatge de la línia de corda.

Un altre element que s'empra per caracteritzar un perfil alar és el seu gruix màxim. Com en el cas de la curvatura, també es dóna el seu valor com a percentatge de la dimensió de la corda, així com la seva posició.

Tot i que els perfils es representen en dos dimensions, en la realitat es té un perfil extruït una certa distància finita. Aquest ample de l'aleró es coneix com envergadura. Aquesta es relaciona amb la corda a partir de la relació d'aspecte (envergadura/corda). En el cas de les ales d'avió, es té una relació d'aspecte elevada, mentre que en els alerons d'automòbils aquesta relació d'aspecte és petita, donades les limitacions mecàniques i de reglament. Més endavant, s'explica quins efectes provoca tenir un perfil alar amb una relació d'aspecte petita.

L'angle d'atac es un altre factor que caracteritza el comportament de l'aleró però, en aquest cas, el seu valor ve definit per l'usuari. Aquest es refereix a l'angle que forma la direcció d'avanç de l'aire que incideix sobre l'aleró amb la línia de corda. Per reglament, no es permet la seva modificació quan el cotxe està en marxa i el seu ajust només es pot fer en parat. Així, l'elecció d'un angle d'atac òptim és vital per al correcte funcionament de l'aleró. S'ha de tenir en compte que augmentant l'angle d'atac s'aconsegueix generar més downforce, ja que la diferència de velocitats, i per tant de pressions, entre l'extradós i l'intradós es fa més elevada, però alhora augmenta també el drag. Aquest angle d'atac es pot continuar augmentant fins que arriba un moment que l'aire de l'intradós no pot romandre adherit a la superfície i se separa, produint el fenomen conegut com entrada en pèrdua de l'aleró. A partir d'aquest angle no és òptim continuar augmentant l'angle d'atac, ja que únicament s'aconsegueix disminuir el valor de downforce generat, mentre que el drag continua augmentant. Aquest angle màxim pel qual l'aleró entra en pèrdua depèn de la geometria de l'aleró, així com del tipus de flux que l'envolta, caracteritzat pel nombre de Reynolds.

Per a l'elecció de l'aleró a emprar en el model, es comença dissenyant un aleró d'un sol element i, a partir dels resultats obtinguts, es decideix si es continua amb un únic perfil, modificant la seva configuració i/o afegint elements auxiliars, o bé si se substitueix per un disseny més complex format per més d'un perfil alar. A continuació, s'enllisten les característiques idònies d'un aleró d'un sol element emprat en l'automobilisme [9]:

- 1- Donat que es treballa amb perfils asimètrics, un angle d'atac de 0° produeix igualment càrrega aerodinàmica. L'angle d'atac màxim s'acostuma a situar entre els 14 i 16° .
- 2- Un major gruix, màxim 12% de la corda, augmenta el C_L . Aquesta relació es dona per a Reynolds elevats ($Re \geq 2 \cdot 10^6$).
- 3- Amb una major curvatura s'aconsegueix majors valors de C_L , amb uns valors d'entre el 3 i el 15% de la corda, però pot entrar en pèrdua amb angles d'atac menors.
- 4- Vora d'atac afilada, amb un radi de l'ordre de l' 1 - 3% de la corda.

A partir d'aquests punts, s'ha escollit un perfil Gottingen 795 (figura 5.6). A l'annex C s'adjunten les diferents gràfiques que caracteritzen el seu funcionament. El valor del Reynolds teòric de funcionament ($1,0265 \cdot 10^6$) és proper al Reynolds amb el que es van efectuar els assajos ($1 \cdot 10^6$). Així, es valida que es poden utilitzar els valors de les gràfiques per efectuar els càlculs teòrics. Per fer el primer estudi s'ha escollit un angle d'atac de 5° , donat que amb aquest valor ja es genera una càrrega aerodinàmica significativa, assegurant-se que no es produeix l'entrada en pèrdua de l'aleró. Amb les gràfiques C_L/α i C_D/α es poden trobar els coeficients aerodinàmics per un angle d'atac determinat. Pel cas de $\alpha=5^\circ$, aquests corresponen a $0,8$ i $0,01$ respectivament. Amb la gràfica C_L/α s'observa, a més, que l'angle d'atac que provoca l'entrada en pèrdua de l'aleró se situa entre els 10 - 12° . Pel cas dels alerons, tots els coeficients aerodinàmics es relacionen amb la superfície en planta, calculada amb el producte de la corda per l'envergadura de l'aleró, en comptes de l'àrea frontal emprada en els càlculs anteriors.

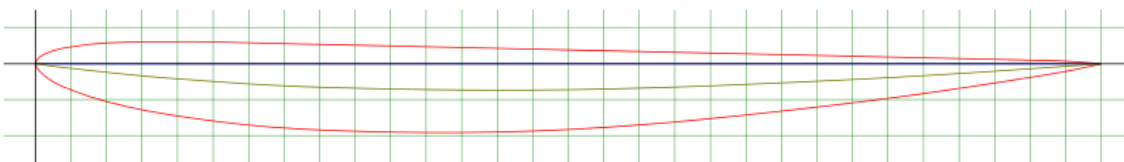


Fig. 5.6. Perfil alar emprat per dissenyar l'aleró (Gottingen 795)



A la taula 5.4 es mostren les característiques del perfil, la configuració escollida i els resultats del càlcul teòric per determinar el downforce i el drag que generarà.

Gottingen 795	
Corda	0,3 m
Envergadura	1,4 m
Màxim gruix/ Posició (%corda)	8% / 30,9%
Màxima curvatura / Posició (%corda)	2,4% / 43,5%
Angle d'atac (α)	5°
Lift	-514,5 N
Drag	6,43 N

Taula 5.4. Característiques del perfil Gottingen 795

$$L = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 0,3 \cdot 1,4 \cdot -0,8 \cdot 50^2 = -514,5 \text{ N}$$

$$D = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \cdot 0,3 \cdot 1,4 \cdot 0,01 \cdot 50^2 = 6,43 \text{ N}$$

A la figura 5.7 es mostra l'aleró muntat en el model.

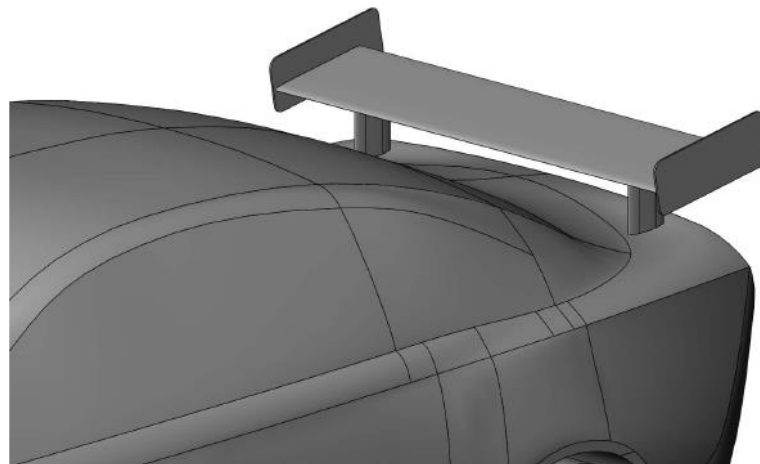


Fig. 5.7. Disseny de l'aleró emprat en el model

Als laterals s'han afegit el que es coneix com derives laterals o end plates. Aquestes augmenten la càrrega aerodinàmica d'un aleró de forma considerable, alhora que redueixen el drag generat. Donat que l'envergadura de l'aleró es finita, al seu extrem final es dona una unió de tres fluxos d'aire diferents: l'aire que circula per l'intradós, el que circula per l'extradós i l'extern dels laterals, que no ha estat alterat per l'aleró. Aquesta unió provoca que l'aire de la part superior, que està a més pressió, es traslladi cap a la part inferior, on la pressió és més baixa. Aquest desplaçament provoca que la diferència de pressions entre les dues parts disminueixi, reduint la càrrega aerodinàmica teòrica que es generaria si l'envergadura fos infinita, alhora que es produeixen remolins marginals, amb el conseqüent drag induït que això comporta. La funció de les derives és evitar aquests desplaçaments, impeding el pas de l'aire d'una part a l'altre, alhora que es disminueix la intensitat dels remolins generats (figura 5.8). Per a una mateixa corda, quant més gran és l'envergadura, menys significatiu és aquest efecte, ja que s'aproximaria més al cas de relació d'aspecte infinita. En el cas dels alerons emprats en l'automobilisme, els quals tenen una relació d'aspecte molt petita comparada amb la de les ales dels avions, aquest efecte és molt significatiu i, per tant, es necessari afegir aquestes derives laterals, ja que el seu efecte és anàleg a augmentar la relació d'aspecte de l'aleró.

El seu disseny és molt senzill ja que, simplificant, es tracta d'una placa plana amb poc gruix inclinada tants graus com l'angle d'atac escollit per l'aleró. La seva grandària està limitada per motius mecànics i de reglament.

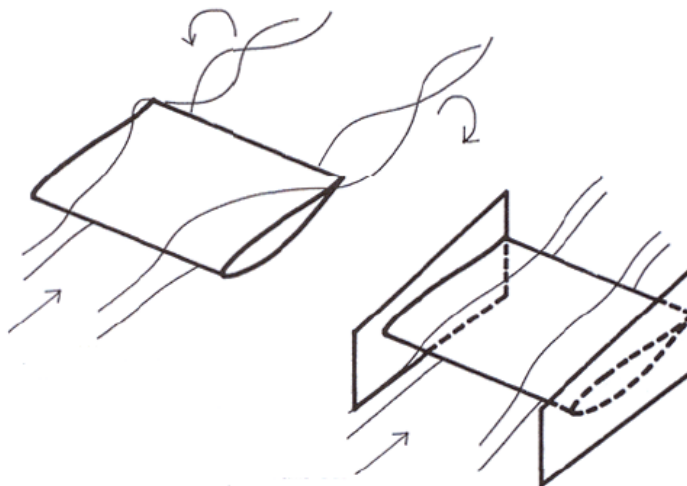


Fig. 5.8. Funcionament de les derives laterals



A la taula 5.5 es mostren els resultats obtinguts de l'anàlisi del model amb l'spoiler davanter i l'aleró posterior. S'ha treballat amb la mateixa àrea frontal que en el cas anterior ($A_f=2,42 \text{ m}^2$) tot i que s'ha de tenir en compte que la incorporació de l'aleró fa augmentar l'àrea total a on el flux actua sobre el vehicle.

C_D	C_L	$C_D \cdot A_f$	$C_L \cdot A_f$	Drag (N)	Lift (N)
0,3254	-0,0457	0,7875	-0,1106	1206,42	-169,37

Taula 5.5. Coeficients aerodinàmics obtinguts amb l'aleró

Comparant els nous valors amb els obtinguts amb només l'spoiler davanter s'observa que s'ha aconseguit generar lift negatiu amb una reducció de -420,69 N respecte al model amb només spoiler davanter, amb una generació de drag addicional de 21,66 N. Aquesta disminució significativa del lift es dona gràcies a la generació de downforce pel propi aleró.

A la taula 5.6 es mostren els resultats obtinguts del càlcul de forces i moments.

	N estàtic (N)	N en moviment(N)	ΔN (N)	% ΔN	C_l
Eix davanter	7845,04	8560,27	715,23	9,12	-0,193
Eix posterior	6418,7	5872,84	-545,86	-8,5	0,147

Taula 5.6. Distribució de forces normals obtingudes amb l'aleró

Amb aquest càlcul és demostra com tota la reducció de lift es dona a l'eix posterior gràcies a l'aleró, on s'obté una reducció respecte al model amb només spoiler davanter de 474,97 N, fent que ara la reducció de força normal a l'eix posterior sigui de 545,86 N respecte al model de sèrie, mentre que la força normal a l'eix davanter roman aproximadament igual, amb una variació de -54,28 N.

També es poden comparar els resultats teòrics efectuats de l'aleró (taula 5.4) amb els obtinguts mitjançant l'anàlisi per tal de validar els càlculs efectuats. La generació de

downforce per l'aleró esperada era de 514,5 N. Donat que tota aquesta càrrega aerodinàmica anirà aplicada a l'eix posterior, es pot calcular la generació de downforce de l'aleró computada per Fluent com l'augment de força normal a l'eix posterior entre aquest últim model (spoiler davanter i aleró posterior) i l'anterior (només spoiler davanter), la qual, com s'ha vist, és de 474,97 N. Aquesta diferència entre el valor esperat i l'obtingut pot ser deguda a diversos factors, com pot ser que el flux d'aire no incideixi horitzontalment a l'aleró donat la zona on s'ha incorporat al vehicle, el nombre de Reynolds, el qual no és exactament el mateix que amb el que s'ha treballat per generar les gràfiques de l'aleró, o a la necessitat d'un mallat més refinat, per obtenir càlculs més exactes. Per discernir-ho, es convenient visualitzar el comportament del flux a la zona de l'aleró i comparar-ho amb el comportament del flux en el cas d'un perfil alar aïllat.

A la figura 5.9 es mostra com varien les línies de corrent d'un fluid real que incideix sobre un perfil NACA 4412 [10], de gruix i curvatura semblants al perfil escollit per a l'aleró del model.

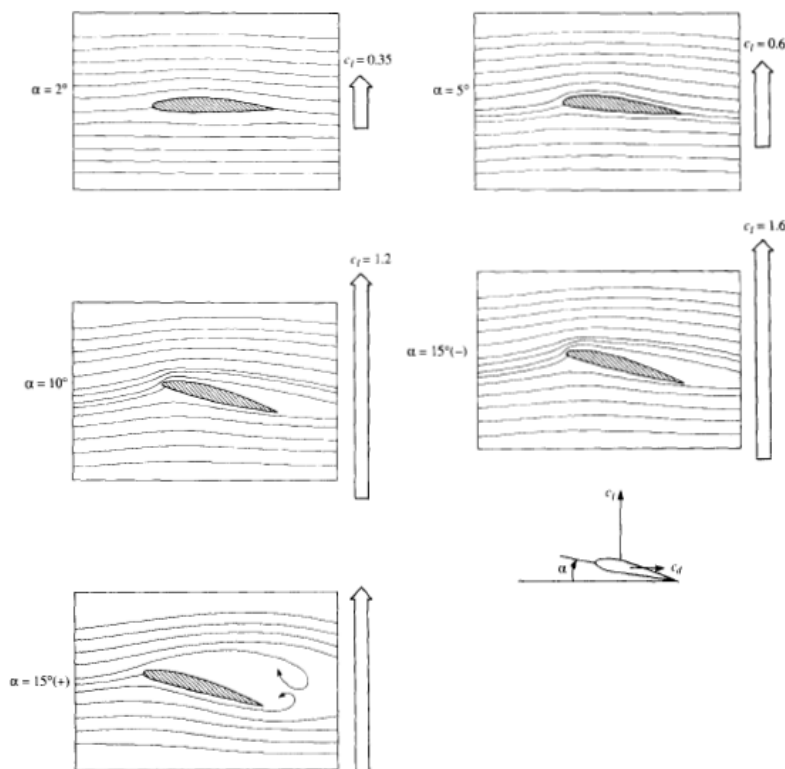


Fig. 5.9. Línies de corrents d'un perfil NACA 4412 per diferents angles d'atac



S'observa com les línies de corrent cada cop es veuen més alterades per l'obstacle que representa el perfil alar a mesura que s'augmenta l'angle d'atac i com aquestes es van separant de la superfície a la zona posterior però sense que l'aleró entri en pèrdua. Alhora, el lift va augmentant fins que la capa límit es desprèn completament per un angle d'atac major de 15° .

Tant en els càlculs teòrics com en els assajos experimentals de la figura 5.9, el perfil alar s'estudia com un element únic, es a dir, si es fixa el flux d'aire a una velocitat i direcció determinada, aquest serà l'aire que incidirà sobre el perfil, donat que no hi ha cap obstacle aigües amunt que pugui alterar el flux d'aire. Si amb el mateix perfil es dissenya un element aerodinàmic, en aquest cas un aleró, les condicions amb que l'aire incidirà sobre aquest no seran les mateixes, encara que s'hagi fixat un flux inicial amb la mateixa direcció i velocitat que en l'assaig experimental del perfil alar, ja que en aquest cas l'aleró està situat a la part posterior del vehicle i el flux d'aire arribarà alterat per la geometria d'aquest aigües amunt. D'aquesta manera, les gràfiques i càlculs teòrics poden donar una idea de la força aerodinàmica que generarà un aleró per a un angle d'atac i velocitat del flux determinats, així com al voltant de quins angles pot entrar en pèrdua, però aquest comportament diferirà del que es dona un cop l'aleró s'ha afegit al cotxe, fent que s'obtinguin resultats diferents. Aquesta variació respecte al comportament teòric dependrà de la geometria del cotxe, la grandària de l'aleró i l'alçada i posició d'aquest respecte al vehicle.

A la figura 5.10 es mostra la distribució de línies de corrent a la zona posterior del model, a on es troba l'aleró. L'angle d'atac fixat és de 5° . Mentre que a la zona de l'extradós les línies romanen adherides a la superfície, s'observa com a l'intradós hi ha una zona de recirculacions a la part frontal, degut a que l'aire que viatja cap a l'intradós no pot vèncer el gradient de pressions advers i la capa límit se separa inicialment, formant un petit vòrtex.

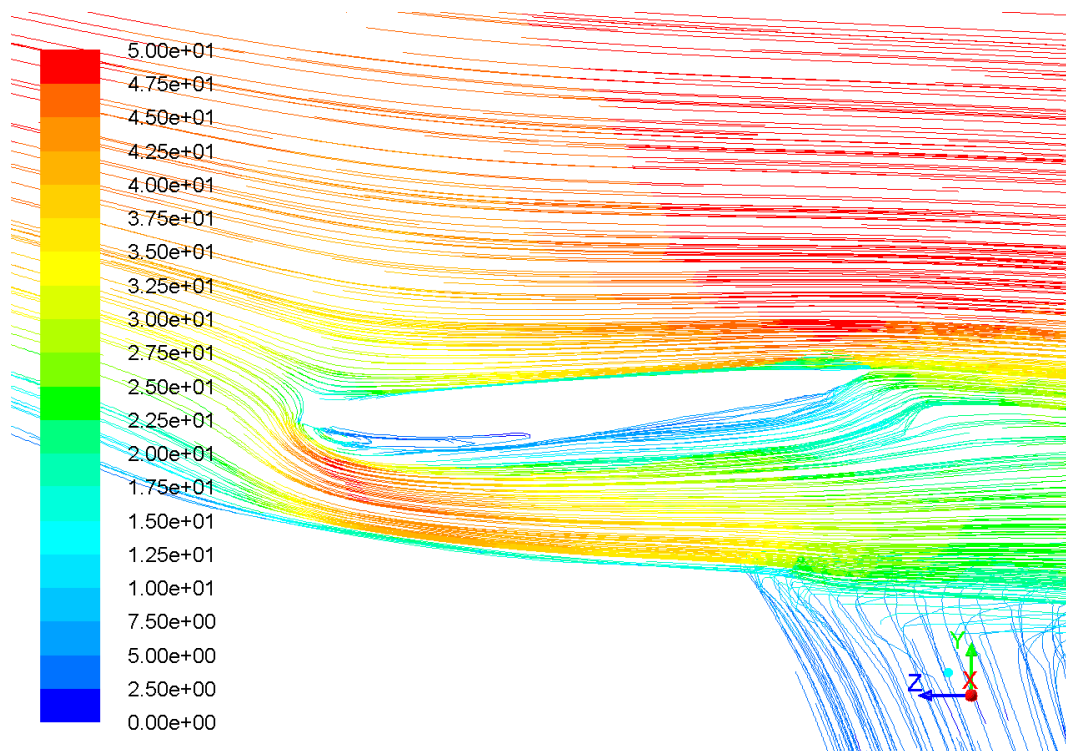


Fig. 5.10. Línies de corrents a la zona de l'aleró. Unitats: m/s

Comparant amb el resultat experimental del perfil NACA 4412 amb el mateix angle d'atac, s'observa que les línies de corrent no es corresponen amb el cas d'un aleró de característiques semblats i assajat en un túnel de vent sense cap obstacle, tal i com s'esperava. L'aire està descendent del sostre i, per tant, la direcció d'incidència no és completament horitzontal, sinó que està lleugerament inclinada cap avall, a diferència de les línies de corrent del perfil NACA 4412, les quals incideixen horitzontalment. Per a un angle d'atac zero, el punt d'estancament es troba just a la vora d'entrada. A mesura que s'augmenta l'angle d'atac, el punt d'estancament es desplaça en sentit antihorari cap a l'intradós pel cas del perfil NACA 4412 (emprat en l'aeronàutica) o en sentit horari cap a l'extradós, en el cas del perfil emprat en l'aleró del model. Així, per a un angle d'atac de 5° , el punt d'estancament de l'aleró del model s'haurà desplaçat de la vora d'entrada cap a l'extradós però, addicionalment, s'ha de tenir en compte que la direcció d'incidència no es completament horitzontal, sinó que té una component vertical negativa que provoca que el punt d'estancament estigui desplaçat encara més lluny de la vora d'entrada. D'aquesta manera, la distribució de les línies de corrent de



l'aleró del model s'assembla més a les del perfil NACA 4412 per a un angle d'atac major, ja que el punt d'estancament es trobarà més allunyat de la vora d'entrada. Si es compara amb les línies de corrent del perfil NACA 4412 per a un angle d'atac de 10° , s'observa que les línies de corrent són més semblants, tot i que el comportament no serà igual.

A la figures 5.11 es mostra la distribució de velocitats a la regió de l'aleró.

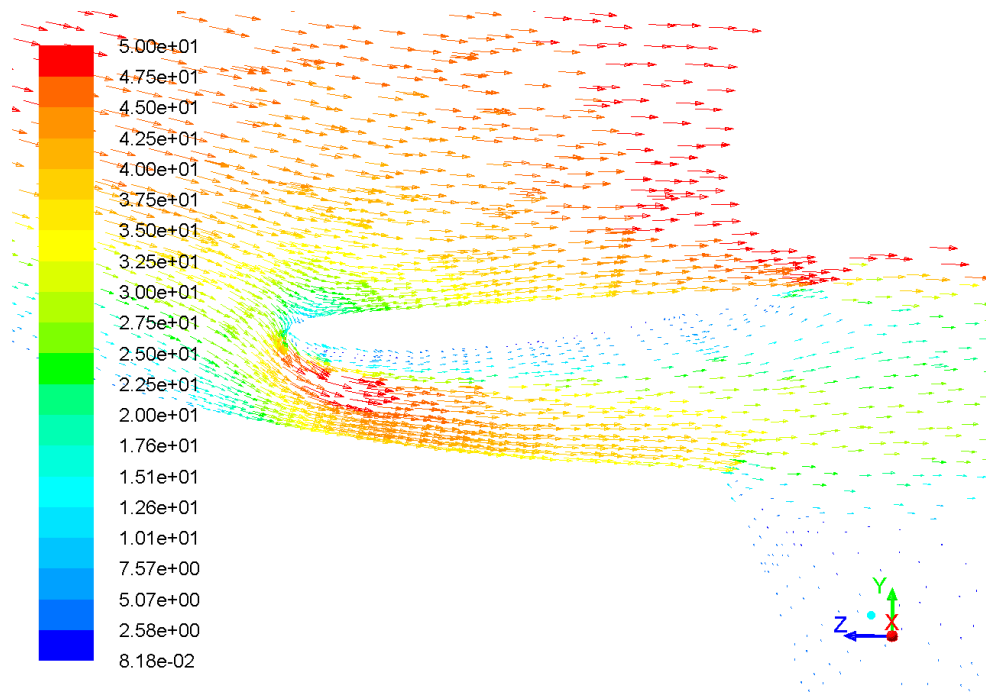


Fig. 5.11. Distribució de velocitats a la zona de l'aleró. Unitats: m/s

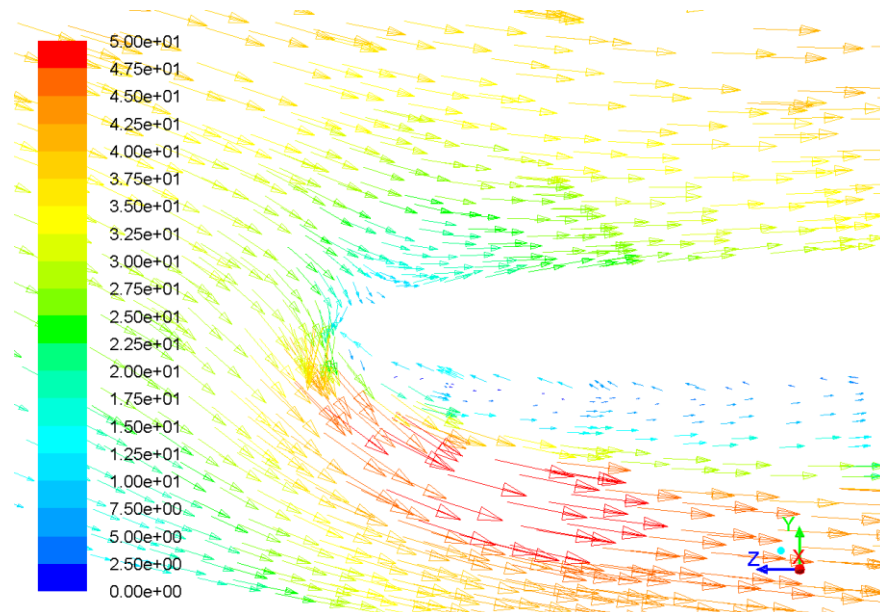


Fig. 5.12. Vòrtex que es genera a la part inicial de l'aleró. Unitats: m/s

A la figura 5.12 es mostra una ampliació de la zona del vòrtex de l'intradós.

A la figura 5.13 queda palesa la diferència de pressions entre l'intradós i l'extradós. S'observa també com el punt d'estancament s'ha desplaçat a la part de l'extradós (zona vermella) i com es produeix una zona local de depressions altes a l'intradós degut al petit vòrtex que es produeix (zona blava).

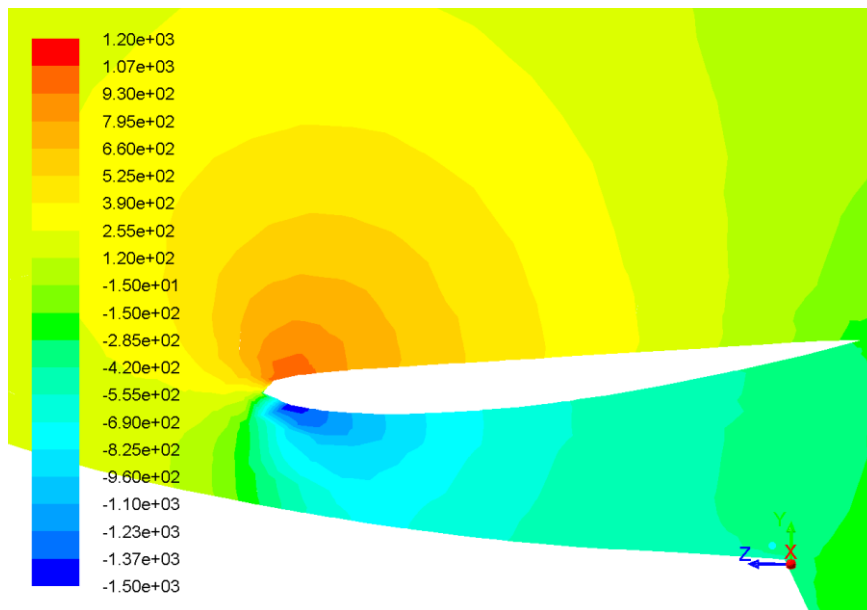


Fig. 5.13. Distribució de pressions a l'aleró. Unitats: Pa

Per últim, es mostra la distribució de velocitats en un pla perpendicular a la direcció del flux ubicat a la part frontal de l'aleró (figura 5.14).

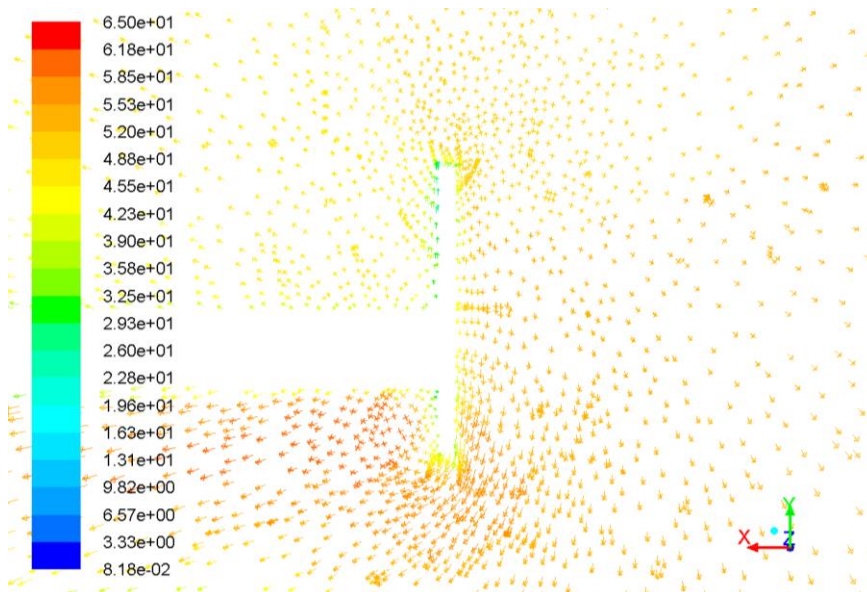


Fig. 5.14. Distribució de velocitats en un pla perpendicular ubicat a la zona central de l'aleró. Unitats: m/s



Es pot observar com les derives laterals redueixen l'aire que circula cap a l'intradós, reduint el drag induït generat pels remolins marginals que es produeixen, tot i que no aconsegueix evitar-ho completament.

Degut a la diferència de comportament de l'aleró respecte al comportament teòric esperat, el més segur és que aquesta diferència s'incrementi a mesura que augmenta l'angle d'atac. Així, es possible que el downforce generat continuï augmentat per angles d'atac majors sense que es produeixi un augment de drag massa elevat. Tot i que en aquest cas s'han obtingut forces aerodinàmiques semblant a les calculades teòricament, és d'esperar que el vòrtex generat a l'intradós augmentarà per angles d'atac majors i els resultats poden variar significativament. En aquest cas, l'única manera d'estudiar l'aleró és efectuant anàlisis numèriques amb Fluent.

Com a exemple d'aquesta diferència de comportament de l'aleró, es pot comparar aquest cas amb un anàlisi semblant efectuat mitjançant CFD[11]. A la figura 5.15 es mostra la distribució de velocitats obtinguda en l'estudi d'un gran turisme al qual se li ha afegit un spoiler posterior i un aleró.

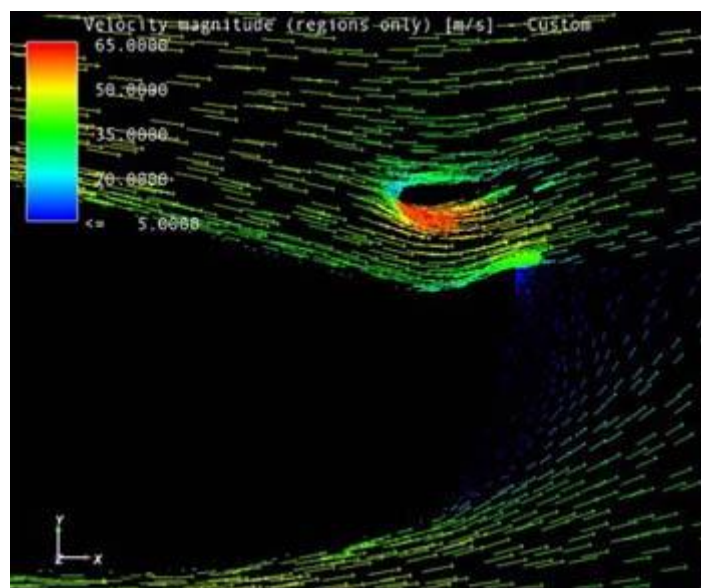


Fig. 5.15. Distribució de velocitats a la zona de l'aleró d'un estudi semblant

S'observa com el flux d'aire tampoc incideix horitzontalment sobre l'aleró, sinó que ho fa sobre l'extradós. L'angle d'atac és de 8° , però les línies de corrent són més semblants a les obtingudes per l'aleró aïllat amb un angle d'atac de 16° . L'aleró comença a donar indicis de separació de capa límit i l'augment d'angle d'atac estimat que pot suportar abans d'entrar en

pèrdua és de 2 a 4 graus. Tot i això, els resultats amb CFD mostren que es continua generant downforce per sobre els 12 graus, però cada cop menys, mentre que el drag només comença a augmentar abruptament a partir d'aquest punt. Tot i que aquest anàlisi no es pot comparar amb el comportament esperat de l'aleró escollit en aquest treball per angles d'atac major, ja que les condicions i la geometria del vehicle són diferents, sí que es pot extreure que és plausible que les forces aerodinàmiques que generi difereixin de les esperades teòricament i que, tot i tenir separació de la capa límit, el downforce pugui augmentar sense que això comporti un corresponent augment de drag elevat.

5.3. Faldons laterals

Aquesta millora no genera downforce per sí mateixa, a diferència de l'aleró i l'spoiler davanter, sinó que millora l'efectivitat d'aquest últim. Es tracta d'unes plaques que s'ubiquen als laterals del vehicle a la zona inferior i el seu objectiu és ajudar a mantenir el buit en aquesta regió, creat per l'spoiler davanter. Donat que es crea una zona de baixes pressions a la part davantera, ara és l'aire dels laterals el que es desplaça cap a la part inferior, a diferència del model de sèrie, on era l'aire de la part inferior el que escapava cap als laterals, creant remolins marginals. Si l'aire dels laterals circula cap a la zona inferior, es perd el buit generat inicialment, fent que augmenti la pressió i que es redueixi el downforce que es pot generar.

A la figura 5.16 es mostra un dels faldons laterals instal·lats al model. Inicialment es dissenya perquè quedi una separació entre terra i faldó igual a la separació entre spoiler davanter i terra (alçada 130 mm). S'observa com l'efecte que produeix és similar a reduir l'altura del vehicle, ja que aquest es trobarà més a prop del terra, reduint la distància de separació.

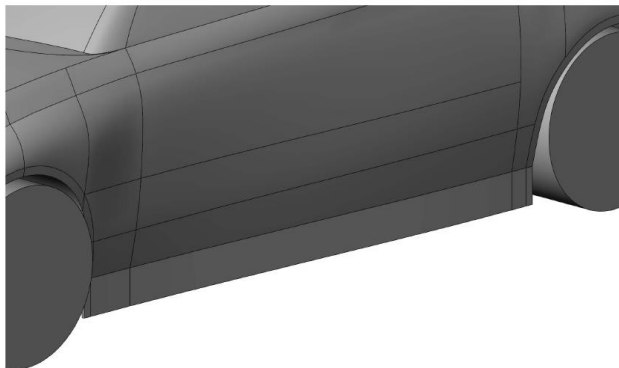


Fig. 5.16. Faldó lateral instal·lat en el model



A la figura 5.17 es mostra la distribució de velocitats del flux d'aire en el mateix pla que l'emprat en la figura 4.17. Com es pot observar, el comportament que es dona no és l'esperat i l'efecte que produeix és diferent al que teòricament s'esperava, ja que l'aire continua escapant-se de la part inferior cap als laterals.

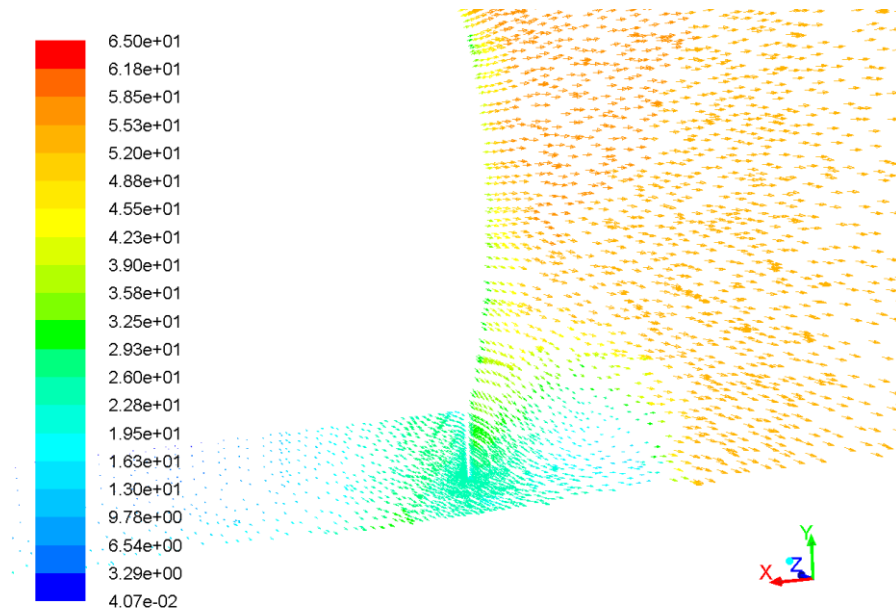


Fig. 5.17. Distribució de velocitats al pla perpendicular al flux. Unitats: m/s

Això és degut a que l'spoiler davanter no aconsegueix crear un buit idoni a la part inferior del vehicle, segurament per l'elevada separació entre el fons del vehicle i el terra. D'aquesta manera, la pressió dels laterals continua sent menor que la de la zona inferior i l'aire tendeix a escapar fora de la regió del terra pels laterals, com es pot observar a la figura 5.18.

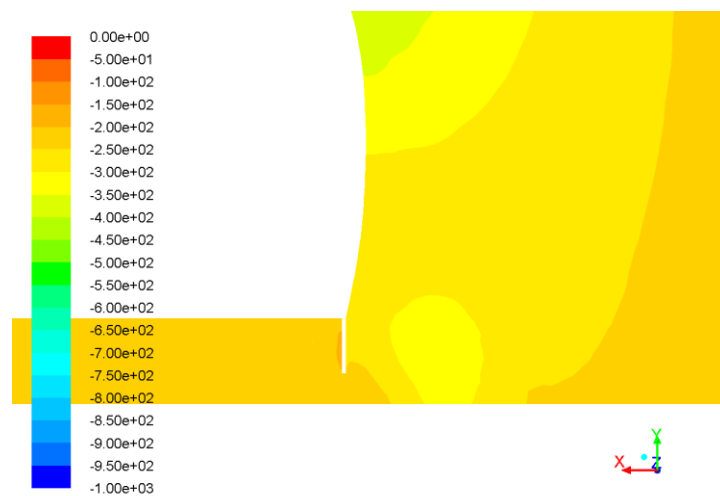


Fig. 5.18. Distribució de pressions al pla perpendicular al flux. Unitats: Pa

En aquest cas, l'efecte que s'aconsegueix a l'afegir els faldons laterals és reduir la quantitat d'aire que escapa de la regió inferior i, d'aquesta manera, es minva la magnitud del remolí marginal que es produeix. Es pot observar la reducció de la vorticitat produïda pel model amb spoiler davanter i aleró (figura 5.19) respecte a la produïda pel mateix model amb els faldons laterals (figura 5.20).

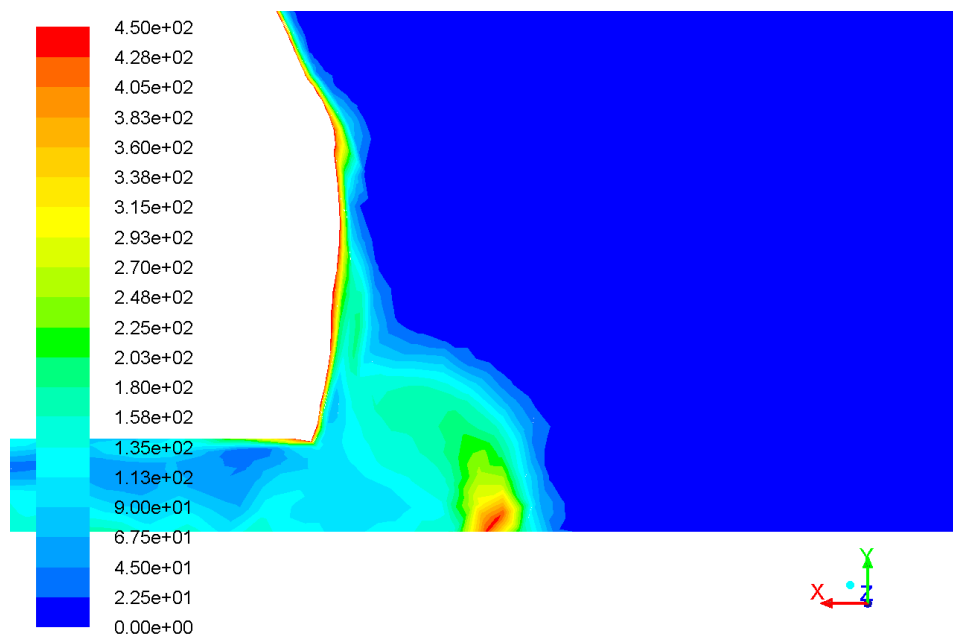


Fig. 5.19. Vorticitat del model sense faldons laterals. Unitats: s^{-1}

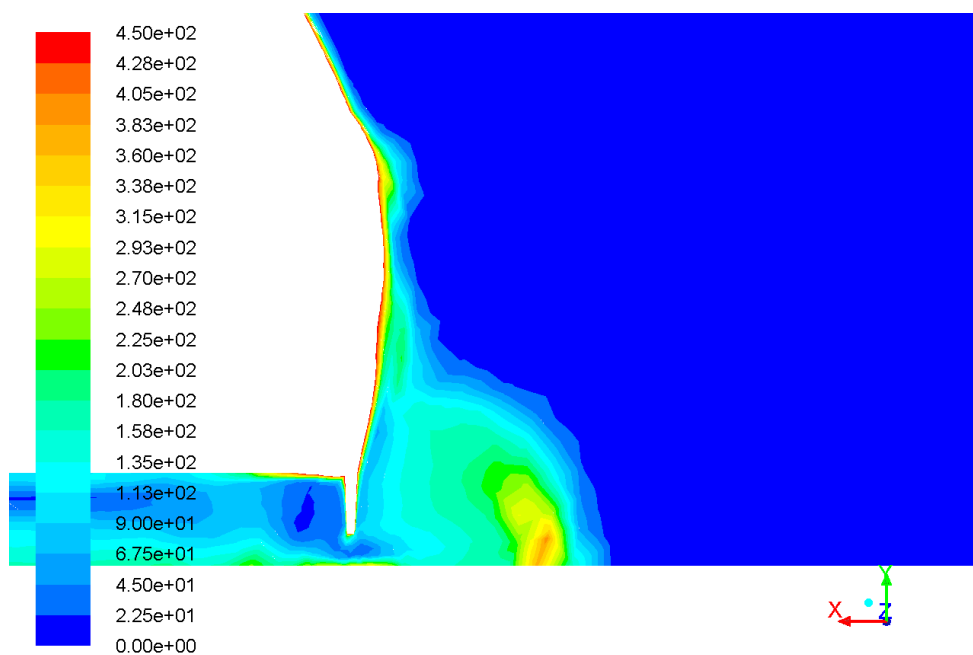


Fig. 5.20. Vorticitat del model amb faldons laterals. Unitats: s^{-1}



Per tant, si no s'aconsegueix crear una pressió menor a la part inferior del vehicle, l'aire continua escapant cap als laterals i la funció dels faldons en aquest cas és reduir el drag induït pels remolins marginals, alhora que augmenta el lift total, donat que més quantitat d'aire queda atrapada a la regió inferior. A la taula 5.7 es mostren els valors de coeficients i forces aerodinàmiques obtinguts. L'àrea frontal continua sent $2,42 \text{ m}^2$, ja que els faldons s'ubiquen perpendicularment a la direcció del flux i es pot negligir la seva contribució a l'àrea frontal total.

C_D	C_L	$C_D \cdot A_f$	$C_L \cdot A_f$	Drag (N)	Lift (N)
0,3092	0,0138	0,7483	0,0334	1146,28	51,1

Taula 5.7. Coeficients aerodinàmics obtinguts en el model amb faldons laterals

A la taula 5.8 es mostren els valors obtinguts de la nova distribució de forces normals amb aquesta nova millora. S'observa com tant en l'eix davanter com en el posterior la força normal s'ha vist reduïda 147,45 i 73,03 N, respectivament, comparada amb l'obtinguda en la millora anterior.

	N estàtic (N)	N en moviment(N)	ΔN (N)	% ΔN	C_l
Eix davanter	7845,04	8412,82	567,78	7,24	-0,153
Eix posterior	6418,7	5799,82	-618,88	-9,64	0,167

Taula 5.8. Forces normals obtingudes en el model amb faldons laterals

A partir dels resultats que s'han obtingut, s'ha pogut comprovar que es pot emprar els faldons laterals de dues maneres diferents. La primera opció seria per evitar la generació de remolins marginals, els quals provoquen drag induït, quan la pressió a la part inferior del vehicle es més elevada que la dels laterals. La segona opció només es pot aplicar quan s'aconsegueix que la pressió de la part inferior del vehicle sigui menor que la dels laterals. En aquest cas, la funció dels faldons serà evitar que l'aire dels laterals circuli cap a la regió inferior del vehicle, donat que d'aquesta manera es perdria el buit aconseguit, fent que la pressió en aquesta zona

augmentés i disminuís el downforce total aconseguit.

5.4. Alternatives descartades

Com a últim punt, s'exposen altres millores aerodinàmiques que han sigut descartades, amb l'explicació dels motius pertinents pels quals no s'han afegit al model.

5.4.1. Spoiler posterior

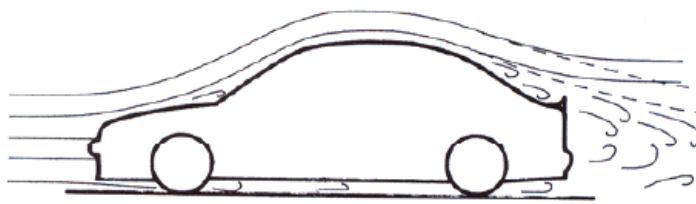


Fig. 5.21. Funcionament d'un spoiler posterior

El seu funcionament és el mateix que l'spoiler davanter, però el seu efecte a la part posterior del vehicle és diferent. En aquest cas, es col·loca el que seria l'anàleg de l'air dam just a la part final del vehicle, sense deixar cap espai entre aquest i la carrosseria (figura 5.21). El seu efecte es propiciar que el flux d'aire que baixa del sostre se separi abans d'arribar a la part final, creant una estela com la de la part posterior del vehicle. D'aquesta manera, es frena el flux en aquesta zona, fent que es creïn pressions no tant baixes com les que produeix el flux d'aire degut a la seva velocitat si aquest roman adherit a la superfície en aquesta zona, fet que genera lift a l'eix posterior. El drag que produeix depèn de l'altura de l'spoiler, i en alguns casos pot fins i tot reduir-lo. Tot i això, s'ha descartat el seu ús donat que s'aconsegueix una major càrrega aerodinàmica amb un aleró, i en el cas del model estudiat, on pràcticament tot el lift es genera a l'eix posterior, a més del repartiment de masses desplaçat cap a l'eix davanter, fa que sigui necessari produir una càrrega aerodinàmica elevada a l'eix posterior.



5.4.2. Efecte terra

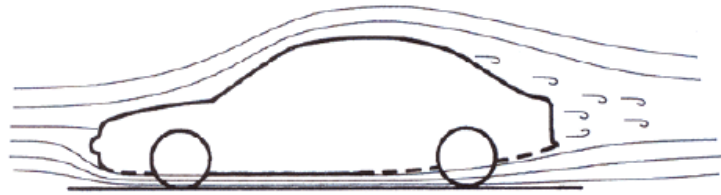


Fig. 5.22. Funcionament de l'efecte terra

Aquest tipus de millora és molt òptima, donat que s'aconsegueix generar càrrega aerodinàmica amb la pròpia geometria del cotxe, amb un augment de drag mínim. En el cas del model, la geometria de la part inferior del vehicle fa que es produeixi una capa límit molt ampla, la qual s'estén fins al terra i es pot produir una interferència que fa que el flux esdevingui lent i turbulent i que s'acabi mesclant amb l'estela creada a la part posterior. Si es dissenya la part inferior del cotxe de forma que junt amb el terra es pugui produir l'efecte Venturi, amb una entrada que condueixi el flux cap a la zona central més estreta i un difusor divergent a la part posterior que augmenti la secció de pas per ajudar al flux a abandonar el vehicle (figura 5.22), es facilita la circulació d'aire per la part inferior, retardant la formació de la capa límit i fent que el flux circuli amb més velocitat, creant baixes pressions. Per produir l'efecte terra, és necessari que la distància entre el terra i el fons del vehicle sigui petita. Tot i els beneficis d'aquesta millora, s'ha descartat donat que suposa fer canvis en la geometria del cotxe, i les condicions establertes en aquest treball són millorar l'aerodinàmica del vehicle únicament amb apèndixs aerodinàmics, sense modificar la geometria original del vehicle. Addicionalment, aquesta millora també requereix que el fons sigui pla i, encara que el model amb el que s'han fet els càlculs compleix aquesta condició, això es degut a les simplificacions efectuades, ja que el model real té un fons irregular amb molts obstacles.

5.4.3. Plaques d'enfonsament

Es tracta d'un apèndix a primera vista senzill, ja que són plaques planes amb inclinació que es fixen a la part davantera del vehicle (figura 5.23).

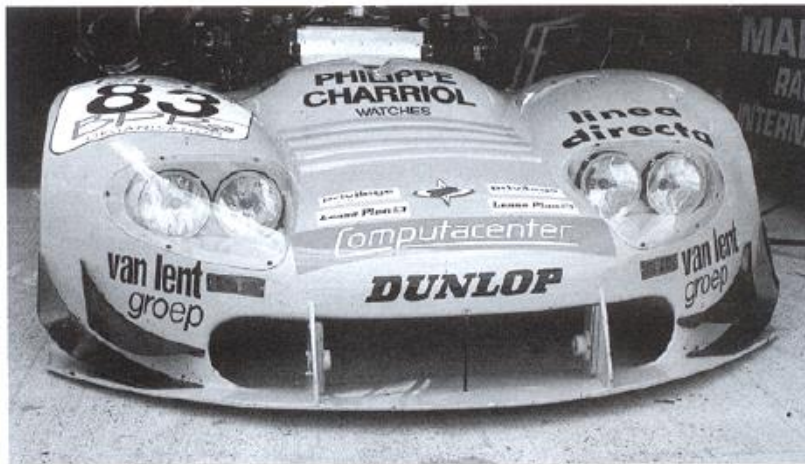


Fig. 5.23. Plaques d'enfonsament instal·lades a la part frontal del vehicle

Tot i la seva senzillesa, es complica generar una càrrega aerodinàmica significativa, i el seu ús està més enfocat a optimitzar la càrrega aerodinàmica total generada. La seva configuració òptima és complicada, i cal fer moltes proves amb CFD i túnel de vent per aconseguir una millora important. Donat les limitacions de càlcul, s'ha descartat la seva incorporació al model.



6. Ajustos dels components aerodinàmics.

Un cop explicades les diferents millores aerodinàmiques que s'incorporen al model i com aquestes modifiquen el flux d'aire i fan variar les forces aerodinàmiques totals que genera el vehicle, és necessari procedir a ajustar cadascuna per obtenir un comportament del vehicle òptim. Inicialment, s'han escollit valors per defecte a partir de dades o càlculs teòrics, ja que l'objectiu era analitzar com es comporten aquest elements. A partir dels resultats obtinguts, cal reajustar els valors emprats perquè el vehicle s'adapti al tipus de circuit a on competeix.

Com s'ha anat observant al llarg dels diferents càlculs efectuats, a mesura que s'aconsegueix que el vehicle generi downforce, el drag també augmenta. Aquest fet és inevitable, ja que per generar càrrega aerodinàmica és necessari afegir elements al vehicle que suposaran un obstacle de més per al flux d'aire. Per tant, es poden distingir dues configuracions generals amb que es pot ajustar el vehicle: una amb molta càrrega aerodinàmica i, per tant, un augment significatiu de drag, i una altra amb menys càrrega aerodinàmica, de manera que l'augment de drag sigui menor.

El tipus de configuració del vehicle estarà determinat per la classe de circuit a on es competeixi. Així, en circuits lents amb moltes corbes, és més òptim una càrrega aerodinàmica major, ja que l'augment de drag no serà tant perjudicial, donat que hi hauran poques rectes i de poca longitud, fent que la velocitat màxima que es pot assolir de per sí sigui baixa, mentre que amb la generació d'un downforce elevat es podran agafar les corbes a més velocitat. El contrari ocorre en circuits ràpids, caracteritzats per rectes molt llargues i corbes amb un radi de curvatura molt elevat. En aquest cas, l'augment de drag en aquests circuits és molt perjudicial, donat que és més important assolir elevades velocitats a les rectes, mentre que a les corbes la càrrega aerodinàmica no és tant important, ja que l'acceleració lateral necessària per agafar-les no és tant elevada, donat l'elevat radi de curvatura d'aquestes, i serà més òptim una configuració amb menys càrrega aerodinàmica.

Un factor important que sempre s'ha de tenir en compte a l'hora de fer l'ajust aerodinàmic del vehicle és la seva maniobrabilitat, independentment del tipus de configuració escollida. A l'apartat 5.4 s'han introduït els conceptes de sobreviratge i subviratge, així com la importància de la ubicació del centre de pressions. Per tant, quan s'escull un tipus de configuració pel

vehicle, s'ha de fer un càlcul de forces a partir de la posició del centre de pressions calculada per Fluent, per tal d'assegurar-se que la generació de càrrega aerodinàmica no estigui descompensada entre els dos eixos del vehicle. A continuació, es resumeixen els resultats que s'obtenen depenent de la càrrega aerodinàmica que es genera a cada eix [12]:

- Si es redueix el coeficient de lift a l'eix davanter (C_{lf}), es disminueix la tendència a que es produeixi un subviratge excessiu i el marge d'estabilitat a l'eix posterior disminueix. En competició, aquest coeficient hauria de ser mínim zero, tot i que es pot arribar a acceptar valors positius.
- La generació de downforce a l'eix posterior augmenta el marge d'estabilitat i millora la maniobrabilitat general del vehicle, disminuint el sobreviratge. Per tant, el coeficient de lift a l'eix posterior (C_{lp}) ha de ser menor de zero. Un valor positiu té efectes negatius.
- Coeficient de moment de capcineig negatiu. Aquest coeficient (representat com C_m) s'obté a partir del moment en l'eix X que provoquen les forces aerodinàmiques respecte al centre de masses del vehicle. Aquest és el causant de la descompensació entre forces normals de l'eix davanter i posterior degut al drag i lift generats i està determinat per la distància entre el centre de pressions i el centre de masses. Així, el centre de pressions ha de quedar a prop del centre de masses, preferiblement al seu darrera, fent que el moment de capcineig sigui negatiu i s'incrementi més la força normal a l'eix del darrera, ja que així es produeix menys sobreviratge, fet preferible per assegurar l'estabilitat en les corbes, ja que si no és més fàcil perdre el control i fer una virolla.
- El coeficient total de lift (C_l) ha de ser negatiu per poder obtenir una major acceleració lateral a les corbes i que el vehicle pugui agafar-les a una major velocitat, a més de millorar la frenada i acceleració a velocitats altes.

Aplicant aquestes condicions al cas del model estudiat, es pot raonar quin ajust és necessari efectuar per arribar a un maniobrabilitat estable. Amb l'última millora efectuada (taules 5.7 i 5.8) és te un C_{lf} negatiu i un C_{lp} positiu, amb un lift total positiu. El vehicle es troba descompensat, ja que es té càrrega aerodinàmica a l'eix davanter mentre que a l'eix posterior encara es produeix més lift del que es produïa al model de sèrie. L'ajust s'ha de centrar, per



tant, en l'aleró, ja que aquest és l'encarregat de generar downforce a l'eix posterior. L'objectiu de moment és eliminar el lift que es genera a l'eix posterior i fer que es produeixi lift total negatiu.

6.1. Ajust de l'aleró

L'ajust efectuat ha estat augmentar l'angle d'atac de l'aleró fins als 10° i ubicar-lo a més alçada donat que, teòricament, aquest tindrà un millor comportament degut a que l'aire en regions més altes es troba menys alterat per l'obstacle que suposa el vehicle. L'ajust ha d'aconseguir generar mínim 618,88 N addicionals a l'eix posterior, que és el lift que es produeix el vehicle a l'eix posterior amb totes les millores afegides (taula 5.8).

A la taula 6.1 es mostren els coeficients i forces aerodinàmiques obtinguts amb aquesta configuració. L'àrea frontal emprada continua sent $A_f = 2,42 \text{ m}^2$.

C_D	C_L	$C_D \cdot A_f$	$C_L \cdot A_f$	Drag (N)	Lift (N)
0,3338	-0,069	0,8078	-0,1670	1237,24	-255,64

Taula 6.1. Coeficients aerodinàmics obtinguts ajustant l'aleró amb un angle d'atac de 10° i ubicant-lo a més alçada

Un dels objectius s'ha complert, ja que el lift que es genera és negatiu, amb un increment de càrrega aerodinàmica total de 306,74 N respecte a l'ajust anterior. Pel que fa al drag, aquest ha augmentat un total de 90,96 N.

A la taula 6.2 es mostren els valors calculats amb l'estudi de forces i moments. S'observa que, mentre que l'eix davanter roman amb una generació de downforce pràcticament igual ($C_{lf} = -0,147$), a l'eix posterior s'ha aconseguit reduir el lift de 618,88 a 289,73 N, produint una càrrega aerodinàmica a l'eix posterior de 329,15 N.

	N estàtic (N)	N en moviment(N)	ΔN (N)	% ΔN	C_l
Eix davanter	7845,04	8390,41	545,37	6,95	-0,147
Eix posterior	6418,7	6128,97	-289,73	-4,51	0,078

Taula 6.2. Forces normals obtingudes ajustant l'aleró amb un angle d'atac de 10° i ubicant-lo a més alçada

Emprant les gràfiques de l'annex C, se sap que, per un angle d'atac de 10° , a l'aleró aïllat li correspon un C_L de -1,1. Amb el mateix càlcul que l'efectuat a l'apartat 5.2, substituint-hi el nou valor de C_L , s'obté que aquest produirà 707,44 N de càrrega aerodinàmica, el que suposa un increment de 195,94 N respecte a l'aleró amb un angle d'atac de 5° , resultat diferent de l'obtingut amb l'aleró instal·lat al model, on es genera un downforce addicional a l'eix posterior de 329,15 N respecte a l'ajust anterior. Es posa de manifest com la diferència entre el comportament de l'aleró aïllat i el mateix aleró instal·lat al model augmenta per angles d'atac major, ja que en el segon es genera més downforce però, alhora, també més drag.

Donat que s'ha efectuat el càlcul mitjançant Fluent, és convenient visualitzar els diferents gràfics per poder comparar-los amb el cas d'angle d'atac 5° i intentar extreure informació per poder predir com es comportarà l'aleró per a angles d'atac més elevats de 10° .

A la figura 6.1 es mostra la distribució de les línies de corrent. S'observa que el petit vòrtex que es formava a la part inicial de l'intradós s'ha desplaçat cap a la part posterior i ha augmentat la seva magnitud significativament. Les línies de corrent de l'extradós romanen adherides a la superfície i l'abandonen suaument però es troben amb una zona de turbulències a la part posterior de l'aleró provocada pel vòrtex de l'intradós.



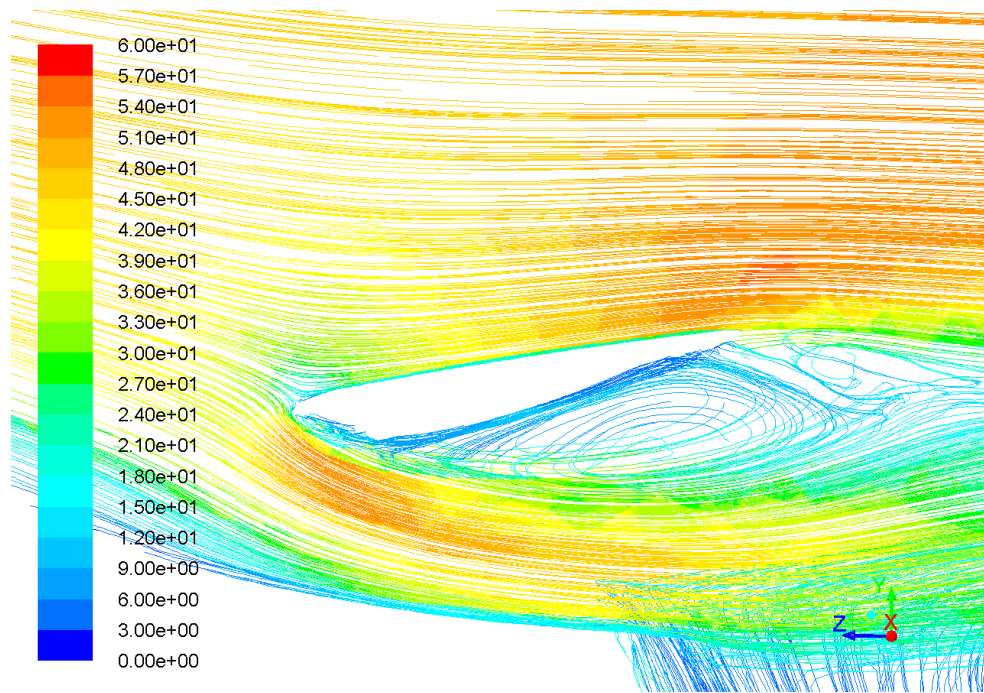


Fig. 6.1. Distribució de les línies de corrent a la zona de l'aleró per a un angle d'atac de 10°. Unitats: m/s

A partir de la distribució de pressions de la figura 6.2 queda patent com l'aleró produeix una càrrega aerodinàmica addicional, ja que les pressions a la zona d'estancament a l'extradós es fan més elevades que en el cas d'angle d'atac a 5 graus. Alhora, donat que el vòrtex s'ha fet més gran, la zona de depressions es reparteix per tot l'intradós, fent que el gradient de pressions entre les dues superfícies de l'aleró sigui més gran.

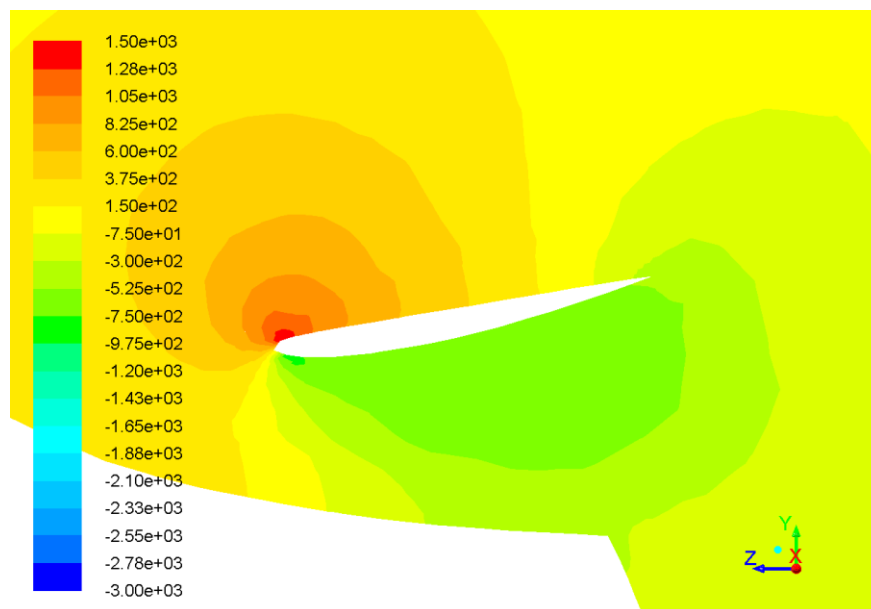


Fig. 6.2. Distribució de les línies de corrent a la zona de l'aleró per a un angle d'atac de 10°. Unitats: Pa

A la figura 6.3 es mostra la zona del vòrtex ampliada, on s'observa com aquest produeix recirculacions al llarg de tot l'intradós.

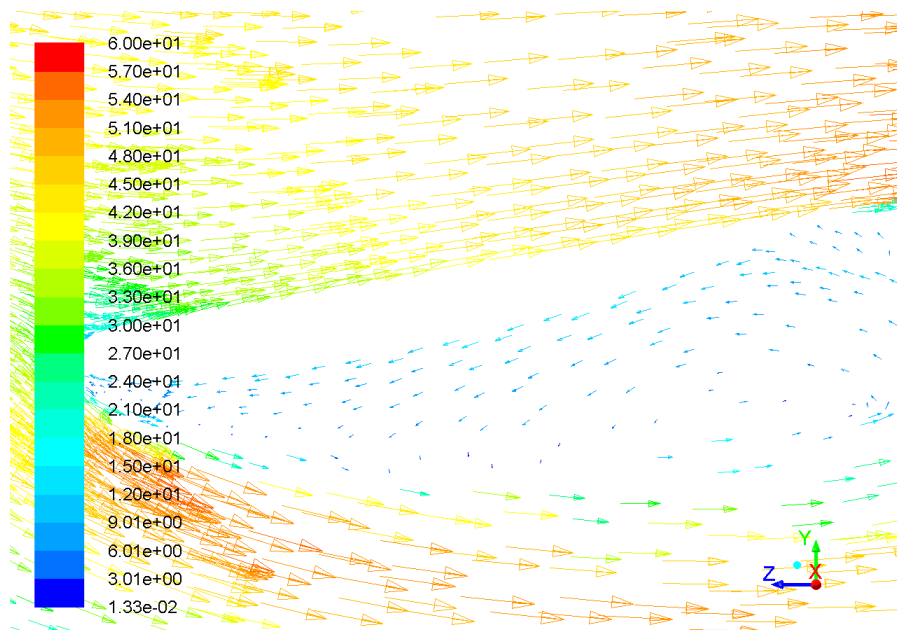


Fig. 6.3. Vòrtex produït per l'aleró amb un angle d'atac de 10° . Unitats: m/s

Tot i generar un downforce major que el teòric, encara no es compleix l'objectiu de eliminar tot el lift de l'eix posterior i la diferència entre la generació de força normal entre els dos eixos encara és significativa. A partir d'aquí, es pot seguir una estratègia diferent per complir els objectius de maniobrabilitat depenent de si es vol una configuració amb molta o poca càrrega aerodinàmica. En els següents apartats, s'explicarà els diferents ajustos efectuats depenent el tipus de configuració i s'efectuarà una comparativa de la distribució del flux obtinguda amb cadascuna.

6.2. Ajust 1. Elevada càrrega aerodinàmica

En aquest tipus d'ajust, es dóna més prioritat a la generació d'un elevat downforce que al conseqüent drag que es genera. Això es degut a que se sap que, pel tipus de circuit a on es vol competir, el desavantatge que suposa assolir velocitats màximes menors a les rectes es veu compensat pel millor rendiment del vehicle a les corbes. Per tant, els diferents ajustos que s'han dut a terme estan encaratats a que els diferents elements aerodinàmics generin més downforce. Alhora, s'han de complir els punts de maniobrabilitat especificats per assegurar una bona maniobrabilitat del vehicle. Seguint aquestes condicions, els ajustos finals efectuats



han sigut els següents:

- Augment de l'angle d'atac de 10° a 12° .
- Augment de l'envergadura de l'aleró de 1,4 a 1,7 m.
- Incorporació d'un flap Gurney a l'aleró.
- Reducció de l'alçada de l'air dam de l'spoiler davanter de 130 a 100 mm
- Augment de l'alçada dels faldons de 130 a 170 mm.

Donat que la part davantera generava molta més força aerodinàmica que la part posterior en els ajustos anteriors, s'ha decidit reduir l'alçada de l'spoiler davanter perquè la distància respecte al terra es faci més gran i l'estela que es forma a la part posterior es vegi reduïda. S'ha augmentat també l'alçada dels faldons per disminuir una mica més la càrrega aerodinàmica de la part davantera i pal·liar l'augment de drag. Pel que fa a l'aleró, s'han dut a terme una sèrie de ajustos encaminats a augmentar la càrrega aerodinàmica generada per compensar la falta de downforce que es donava a la part posterior. S'ha incrementat l'angle d'atac, ja que s'espera que la generació de downforce encara continuï augmentat, i s'ha allargat l'envergadura de l'aleró perquè l'àrea sigui major i augmenti la càrrega aerodinàmica. Per últim, s'ha afegit un apèndix a l'aleró conegut com flap Gurney per millorar el seu rendiment.

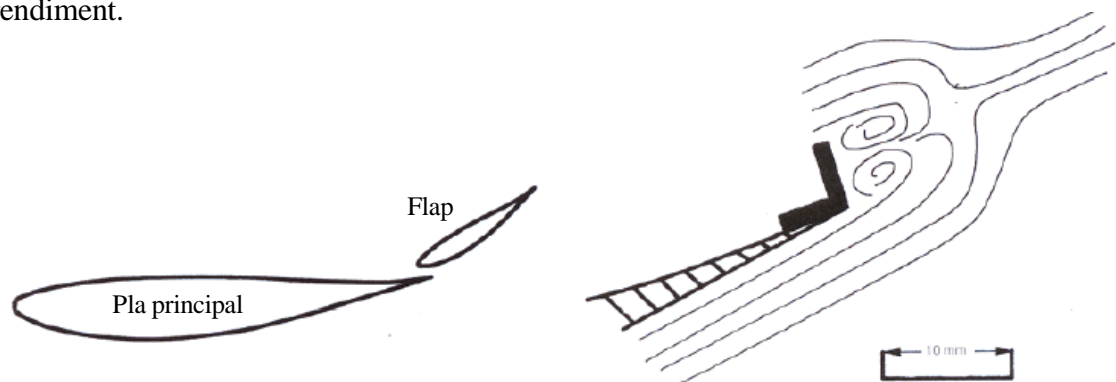


Fig. 6.4. Funcionament d'un flap Gurney (dreta). L'efecte que produeix es pot comparar amb el que es dona a l'afegir un flap a l'aleró principal (esquerra)

Es tracta de una petita aleta d'angle recte que es fixa a la vora de fuga de l'aleró (figura 6.4). Amb això, es generen un parell de vòrtexs inversos a la part posterior que desvien el flux que surt per la vora de fuga cap a dalt, fent que l'aire circuli més ràpidament per l'intradós, augmentant la càrrega aerodinàmica i prevenint que se separi la capa límit. L'efecte que es

produeix és anàleg al que s'aconsegueix afegint un segon element (flap) a l'aleró principal, el qual desvia part del flux de l'extradós a l'intradós, ajudant a que la capa límit romaní adherida a la superfície i poder així fer treballar l'aleró amb angles d'atac majors. Els perfils Gurney petits generen augments de càrrega aerodinàmica significatius amb un mínim d'increment de la resistència. Si el flap Gurney és massa gran, es produeix més augment de resistència que de càrrega. L'alçada recomanada és d'un 2% de la corda (300mm). Així doncs, s'ha afegit una aleta a l'extradós, a la vora de fuga, perpendicular al flux amb les mesures de la figura 6.5.

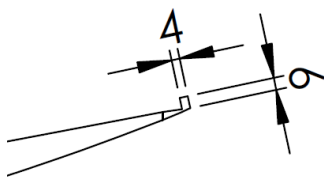


Fig. 6.5. Mesures del flap Gurney en mm

S'ha escollit el perfil Gurney donat que és una opció més senzilla. Tot i això, com passava amb el comportament real de l'aleró enfront al teòric, el funcionament del flap Gurney pot diferir de l'esperat, i és necessari emprar Fluent per saber realment com afectarà al flux de l'aleró.

L'objectiu final de l'ajust és augmentar la generació de downforce alhora que aquesta es transfereix cap a la part posterior.

A la taula 6.3 es mostren els coeficients i forces aerodinàmiques obtingudes amb aquesta configuració. En aquest cas s'ha afegit també el coeficient de moment de capcineig per comprovar que aquest sigui negatiu i proper a zero. Al reduir-se l'alçada de l'spoiler davanter, l'àrea frontal ha disminuït. El seu nou valor és $A_f = 2,406 \text{ m}^2$.

C_D	C_L	$C_D \cdot A_f$	$C_L \cdot A_f$	Drag (N)	Lift (N)	C_m
0,381	-0,320	0,917	-0,770	1402	-1183,1	0,250

Taula 6.3. Coeficients aerodinàmics obtinguts amb l'ajust 1

S'observa com s'ha aconseguit assolir una elevada càrrega aerodinàmica, amb un increment de 1529,46 N de downforce respecte al model original, però com, alhora, també el drag s'ha vist incrementat significativament, amb un augment de 292,22 N respecte al model original.

A la taula 6.4 es mostren els valors de la distribució de forces normals amb aquesta configuració. S'observa com la força normal a l'eix davanter només es veu reduïda en uns 40



N respecte a la configuració anterior (taula 6.2) i com tot el downforce addicional està aplicat a l'eix posterior, ja que es a on s'han efectuat els ajustos més importants, amb un augment respecte a la configuració anterior de 965,94 N. Es compleixen els criteris per assegurar una bona maniobrabilitat, donat que el coeficient de lift total i a ambdós eixos és negatiu, i el centre de pressions, tot i trobar-se al davant del centre de masses (a 0,659 m), fent que el C_m sigui positiu, es troba prou a prop perquè es generi més downforce a l'eix posterior (169,32 N més).

	N estàtic (N)	N en moviment(N)	ΔN (N)	% ΔN	C_l
Eix davanter	7845,04	8351,93	506,89	6,46	-0,138
Eix posterior	6418,7	7094,91	676,21	10,53	-0,184

Taula 6.4. Distribució de forces normal amb l'ajust 1

Amb aquests resultats, es pot extreure que la modificació de l'alçada de l'spoiler no repercuteix en aquest cas en la formació de l'estela a la zona inferior del vehicle o també que és el front splitter el que genera principalment càrrega aerodinàmica a l'spoiler davanter, donat que la força a l'eix es manté pràcticament igual. Igualment, es pot deduir que l'aleró continua augmentant la càrrega aerodinàmica generada amb un increment de l'angle d'atac però el drag comença a créixer a un ritme més elevat. Tot i això, s'ha de tenir en compte l'augment d'àrea de l'aleró i l'addició del flap Gurney, factors que també repercuteixen en el resultat final.

Més endavant es detalla la variació de la distribució del flux a les diferents zones on s'ha dut a terme alguna modificació, quan es comparen ambdues configuracions (apartat 6.4).

6.3. Ajust 2. Poca càrrega aerodinàmica

En aquest cas, es vol ajustar les millores aerodinàmiques del vehicle per a un circuit on la penalització que suposa menys velocitat màxima en les rectes és més elevada que la que es dona per haver d'agafar les corbes a menys velocitat. El drag sempre serà major que el model de sèrie, donat la instal·lació de les diferents millores aerodinàmiques, però es busca que aquest augment sigui mínim. Per a tal fi, la configuració de les diferents millores no pot ser molt agressiva com el cas anterior, amb elevats coeficient de drag i downforce, però ha de

permetre una millora en el comportament del cotxe. Així, l'objectiu és complir els criteris de maniobrabilitat sense que això suposi un augment de drag massa elevat.

Mentre que en el cas d'elevada càrrega aerodinàmica el que s'ha fet és augmentar la càrrega a la part posterior perquè aquesta quedi igualada amb la de la part davantera, el que es fa en aquest ajust és disminuir part de la càrrega que es genera a la part davantera, mitjançant l'spoiler davanter, per tal que la càrrega a la part posterior sigui major. Segons els criteris de maniobrabilitat, es acceptable que es generi lift a l'eix del davant, sempre i quan es compleixin els altres criteris. Així, es pot reduir el downforce generat, encara que aquest es faci positiu, sense que això comporti greus problemes. A partir d'aquestes condicions, els ajustos efectuats han sigut els següents:

- Tornar a augmentar l'alçada de l'air dam de l'spoiler davanter fins al mateix valor que els faldons laterals (170mm).
- Disminuir la longitud del front splitter de 120 a 70 mm.
- Reduir l'alçada del flap Gurney de 6 a 4 mm.
- Afegir làmines planes als laterals dels faldons, paral·leles al terra.

A partir dels resultats de l'apartat anterior, s'ha extret que la disminució d'alçada de l'air dam no afecta significativament a la generació de downforce per part de l'spoiler davanter, ja que l'estela es continua generant, i es preferible augmentar la seva alçada per disminuir la quantitat d'aire que circula per la part inferior. El que produeix més quantitat de downforce, alhora que també redueix la quantitat d'aire que circula per la part inferior conjuntament amb l'air dam, és el front splitter, al qual se li ha disminuït la seva longitud per reduir l'àrea total i així disminuir la zona d'estancament i la diferència de pressions entre la part superior i inferior, fent que la càrrega aerodinàmica que es genera sigui menor. Pel que fa a l'aleró, només s'ha disminuït l'alçada del flap Gurney per reduir l'augment de drag que aquest indueix, a canvi de reduir una mica el downforce generat per l'aleró, ja que no es vol perdre en excés la càrrega aerodinàmica que es genera a la part posterior. Per últim, s'ha afegit un apèndix als faldons semblant al front splitter de l'spoiler davanter, per reduir la quantitat d'aire que circula cap a la part inferior, donat que ara s'espera que es tindran menys pressions a la part inferior del vehicle que als laterals, ja que es redueix la quantitat d'aire que hi circula per l'augment de longitud de l'air dam. També es pretén aprofitat la diferència de pressions entre



els laterals del vehicle i la part inferior per generar càrrega aerodinàmica, a partir del mateix principi que el front splitter.

L'objectiu final és una reducció total de downforce, principalment a l'eix davanter, i de drag generat.

A la taula 6.5 es mostren els coeficients i forces aerodinàmiques obtingudes amb aquesta configuració. A l'incrementar l'alçada de l'spoiler davanter, l'àrea frontal ha augmentat. El seu nou valor és $A_f = 2,485 \text{ m}^2$.

C_D	C_L	$C_D \cdot A_f$	$C_L \cdot A_f$	Drag (N)	Lift (N)	C_m
0,326	-0,050	0,810	-0,124	1239,92	-190,26	-0,065

Taula 6.5. Coeficients aerodinàmics obtinguts amb l'ajust 2

S'observa com s'ha reduït el drag i el downforce respecte a la configuració amb més càrrega aerodinàmica (taula 6.3) en 162,08 N i 992,84 N respectivament. Comparant amb el model de sèrie, aquest ajust genera una càrrega aerodinàmica de 536,62 N amb un augment de drag de 130,14 N.

A la taula 6.6 es mostren els resultats de la distribució de forces normals. Amb aquesta configuració, s'ha reduït tant el downforce generat a l'eix davanter que aquest no pot vèncer al creat a la part posterior, fent que es generi lift. El downforce a l'eix posterior també s'ha vist reduït respecte al model amb més càrrega aerodinàmica, però el seu valor continua sent significatiu. Respecte als criteris de maniobrabilitat, es compleixen tots, donat que és acceptable tenir un coeficient de lift positiu a l'eix davanter. Tot i això, és possible que aquest sigui una mica elevat, fet que produiria problemes de subviratge excessiu. S'ha de tenir en compte que, donada la distribució de masses del model, l'eix davanter és el que rep una força normal major i, tot i aplicar aquesta configuració, el valor a l'eix davanter continua sent més elevat que el de la part posterior. Aquest fet dóna una major marge per permetre que es generi lift a la part davantera del vehicle sense que això comporti greus problemes de maniobrabilitat.

	N estàtic (N)	N en moviment(N)	ΔN (N)	% ΔN	C_l
Eix davanter	7845,04	7520,4	-324,64	-4,14	0,085
Eix posterior	6418,7	6933,6	514,9	8,02	-0,135

Taula 6.6. Distribució de forces normal amb l'ajust 2

Amb aquest resultat s'extreu que la longitud del front spitter de l'spoiler davanter influeix molt en la generació de càrrega aerodinàmica. S'observa també com el flap Gurney té influència en el comportament de l'aleró, ja que la reducció de la seva alçada ha comportat una disminució en la càrrega aerodinàmica a l'eix posterior.

6.4. Comparativa entre els dos ajustos

Per entendre com ha modificat el flux cada ajust i les diferències que es poden donar o no entre una configuració i l'altre, s'ha dut a terme una comparativa a partir dels gràfics generats per Fluent de les diferents zones a on s'han afegit millores.

6.4.1. Spoiler davanter

En ambdues configuracions, s'augmenta la zona d'estancament a la part davantera per l'obstacle que suposa l'air dam, i degut a aquest es crea una estela al seu darrera en els dos casos (figures 6.6 i 6.7). Les diferències es donen en la velocitat amb la que el flux passa per sota del front spitter, la qual es major en l'ajust 1 (més càrrega aerodinàmica) que en l'ajust 2 (menys càrrega aerodinàmica), degut a que el caudal és més elevat en el cas del primer ajust, fent que el flux assoleixi majors velocitats i que la diferència de pressions entre la part superior i inferior del front spitter sigui major, així com creant major depressió a la part inferior del vehicle, generant més downforce addicional.



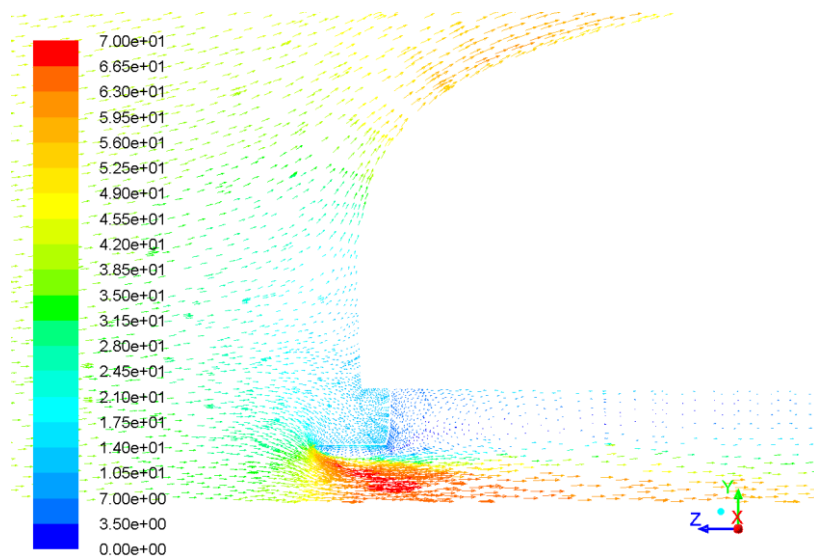


Fig. 6.6. Distribució de velocitats a l' spoiler davanter amb l'ajust 1. Unitats: m/s

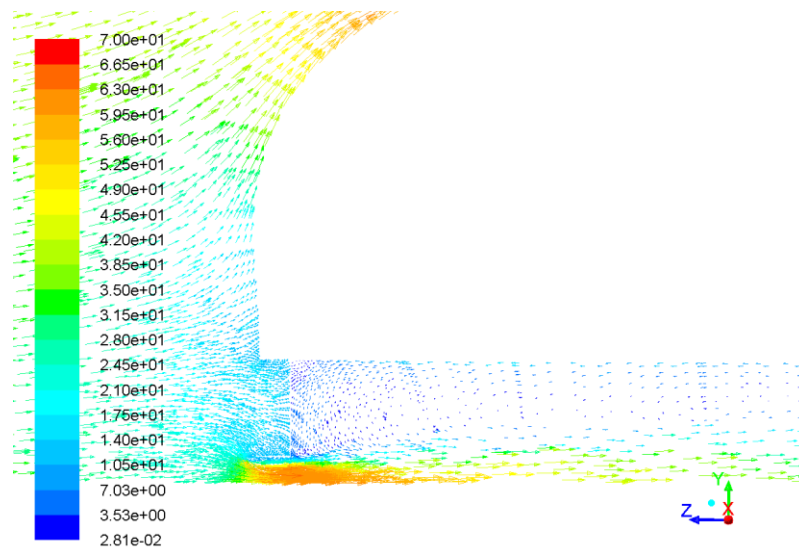


Fig. 6.7. Distribució de velocitats a l' spoiler davanter amb l'ajust 2. Unitats: m/s

A les figures 6.8 i 6.9 es pot observar millor les diferències de pressions que es donen entre els dos ajustos. S'observa com les altes pressions a la zona d'estancament i a la part superior del front spitter són major pel cas de l'ajust 1, alhora que la part inferior té pressions més baixes en l'ajust 1. Les pressions a la part inferior del vehicle també són menors pel cas de l'ajust 1, tot i que aquesta diferència es va reduint a mesura que el vehicle avança. En global, l'ajust 1 acaba produint una diferència de pressions major entre la part superior i la inferior, tant del front spitter com de la part frontal vehicle, generant més càrrega aerodinàmica.

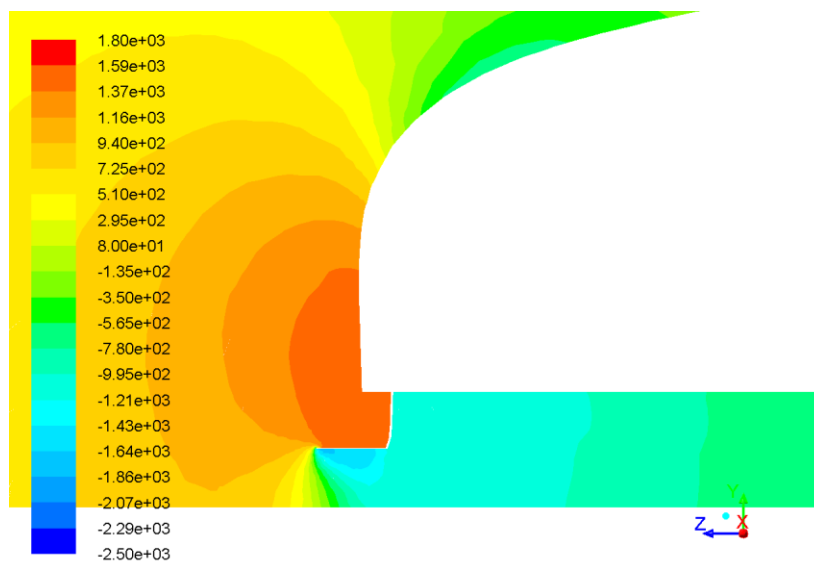


Fig. 6.8. Distribució de pressions a l'spoiler davanter amb l'ajust 1. Unitats: Pa

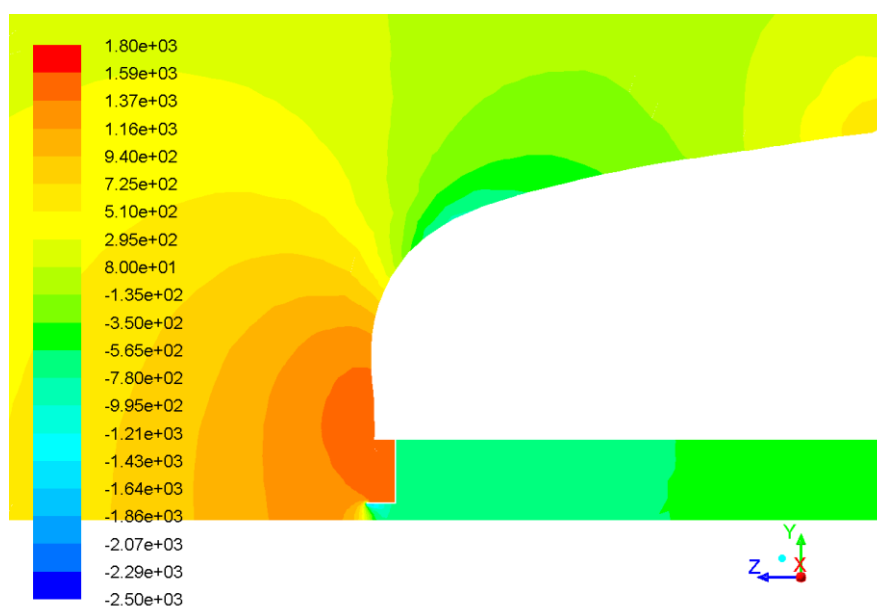


Fig. 6.9. Distribució de pressions a l'spoiler davanter amb l'ajust 2. Unitats: Pa

6.4.2. Faldons

A les figures 6.10 i 6.11 es mostra la vorticitat en un pla perpendicular a l'avanç del flux. Comparant-les, s'observa com el remoli principal es més petit en l'ajust 1 que en el 2. Per tant, el drag induït pels remolins marginals generats a la part inferior del vehicle és major en l'ajust 2 que en el 1. Per entendre perquè es produeix aquest fet, es necessari visualitzar la distribució de velocitats a la zona del faldó pels dos ajusts, la qual es representa a la figura 6.12.



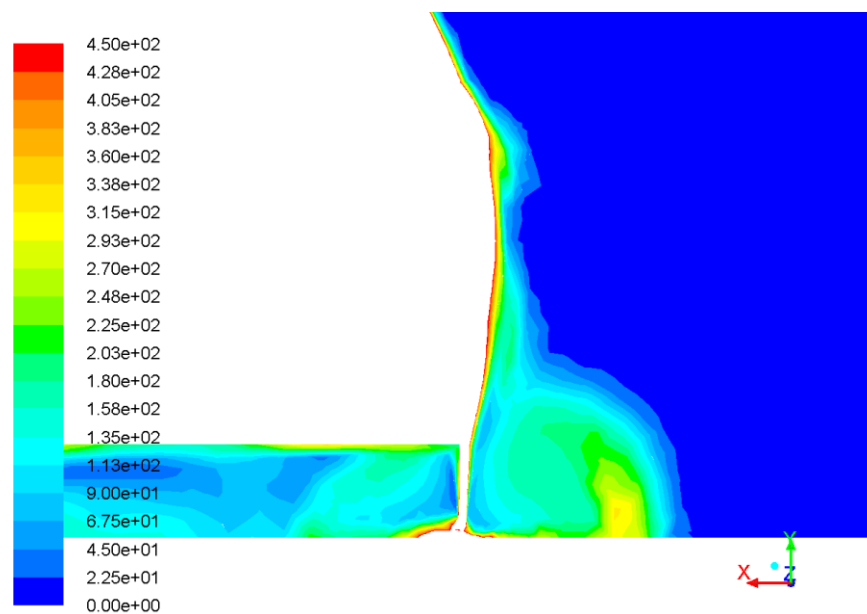


Fig. 6.10. Vorticitat al pla perpendicular al flux amb l'ajust 1. Unitats: s^{-1}

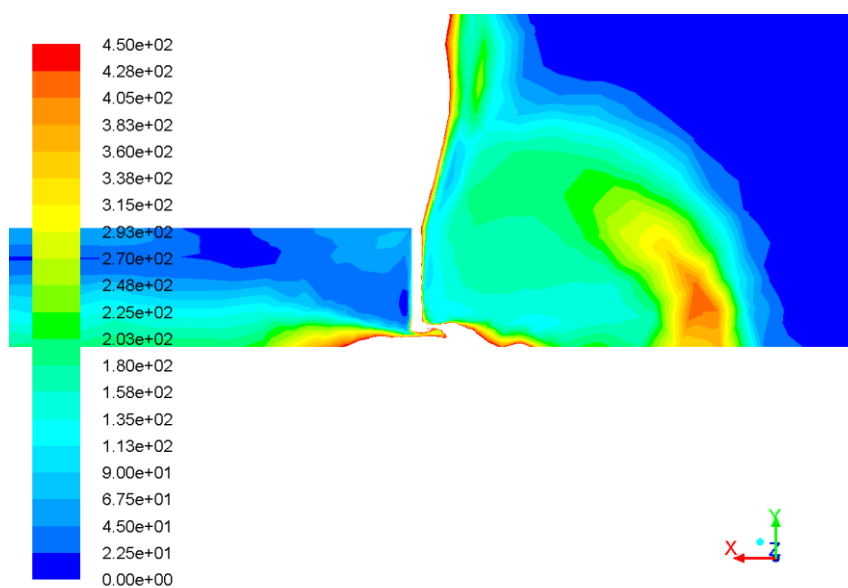


Fig. 6.11. Vorticitat al pla perpendicular al flux amb l'ajust 2. Unitats: s^{-1}

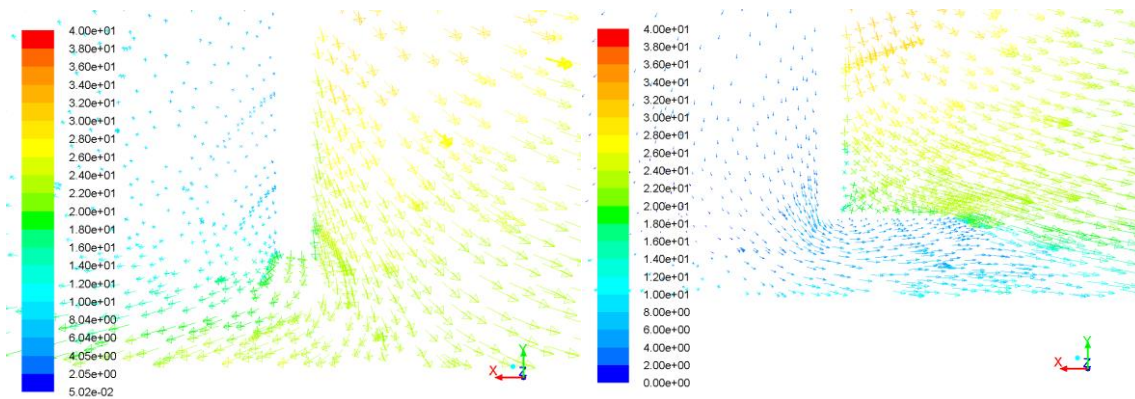


Fig. 6.12. Distribució de velocitats al pla perpendicular al flux amb l'ajust 1 (esquerra) i amb l'ajust 2 (dreta). Unitats: s^{-1}

En el cas de l'ajust 1, la pressió a la part inferior del vehicle és menor que la dels laterals, i una part d'aquest aire es desvia cap a la part inferior, mentre que una altra part es desvia cap als costats, formant un remoli marginal però de menor magnitud. En el cas de l'ajust 2, la situació és la contrària, i l'aire de la part inferior, a més pressió, escapa cap als costats i genera un vòrtex marginal de més elevada magnitud.

S'extreu per tant que, tot i que l'ajust 2 redueix la quantitat d'aire que circula per sota el vehicle, fet que en un principi sembla que hauria de crear una zona de pressions més baixes, es dona que és amb l'ajust 1 que s'aconsegueix majors depressions en aquesta zona, donat la major velocitat del flux que viatja entre l'estela creada per l'air dam i el terra. S'observa també com l'apèndix dels faldons de l'ajust 2 funciona però amb una diferència de pressions poc significativa.

6.4.3. Aleró

Per veure com varia la càrrega que pot generar l'aleró per diferents altures del flap Gurney, es mostra a les figures 6.13 i 6.14 la distribució de pressions de cada ajust. Cal comentar que, donat que s'han fet ajusts aigües amunt, el flux que arriba a l'aleró de cada ajust pot haver canviat significativament, fent que no es puguin extreure conclusions definitives del canvi de comportament de l'aleró amb la modificació de l'altura del flap Gurney.

Pel que fa a l'extradós, les pressions a la zona d'estancament de l'ajust 1 són lleugerament superiors a les de l'ajust 2. També les pressions a la part posterior de l'extradós són superiors en el cas de l'ajust 1 donat que, al ser més gran el flap Gurney que en l'ajust 2, les pressions



en aquesta zona són més elevades. Contràriament, a l'intradós sembla que les pressions són més baixes en el cas de l'ajust 2, sobretot a la part davantera. Tot i això, finalment el downforce que genera l'aleró amb l'ajust 1 és més elevat que amb l'ajust 2.

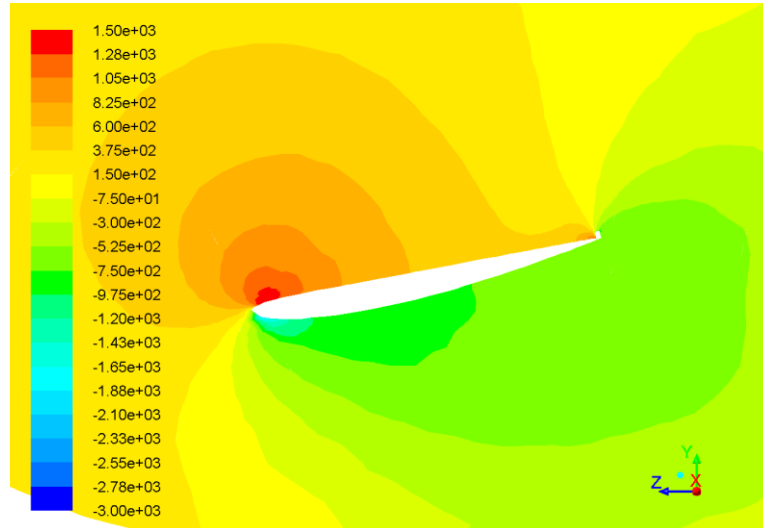


Fig. 6.13. Distribució de pressions a l'aleró amb l'ajust 1. Unitats: Pa

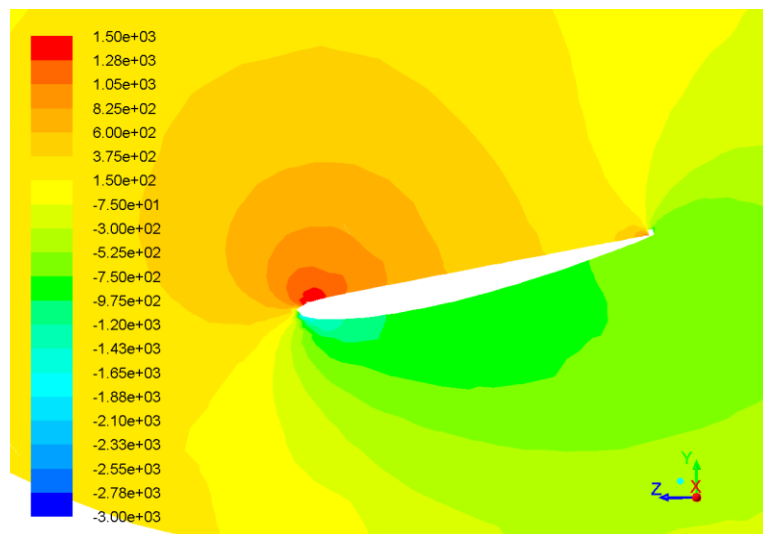


Fig. 6.14. Distribució de pressions a l'aleró amb l'ajust 2. Unitats: Pa

Comparant ambdues figures amb la distribució de pressions pel cas de l'aleró amb angle d'atac 10° sense flap Gurney (apartat 6.1), s'observa que, tot i que la magnitud de les pressions al punt d'estancament són semblants, la distribució total de pressions a tot l'extradós es major en el cas de l'aleró amb angle d'atac 12° i flap Gurney. Pel que fa a la zona inferior, la distribució global de pressions és més baixa que en el cas de l'aleró amb angle d'atac 10° ,

fent que, en total, el downforce generat sigui major si es fixa un angle d'atac de 12° i s'incorpora una flap Gurney.

Visualitzant la distribució de línies de corrent a l'aleró pels dos ajusts (figures 6.15 i 6.16), es té una possible explicació de per què es tenen pressions més baixes pel cas de l'ajust 2. En el cas de l'ajust 1, s'observa com s'ha generat el segon vòrtex a la part posterior, de sentit contrari al vòrtex principal, mostrat a la figura 6.4. Donat que la separació del flux es inevitable, sembla que aquest segon vòrtex comprimeix el vòrtex principal, disminuint la zona de baixes pressions. En el cas de l'ajust 2, amb un flap Gurney més petit, aquest segon vòrtex no s'acaba de generar completament, fent que el flux de l'intradós sigui més caòtic, amb una zona de baixes pressions major.

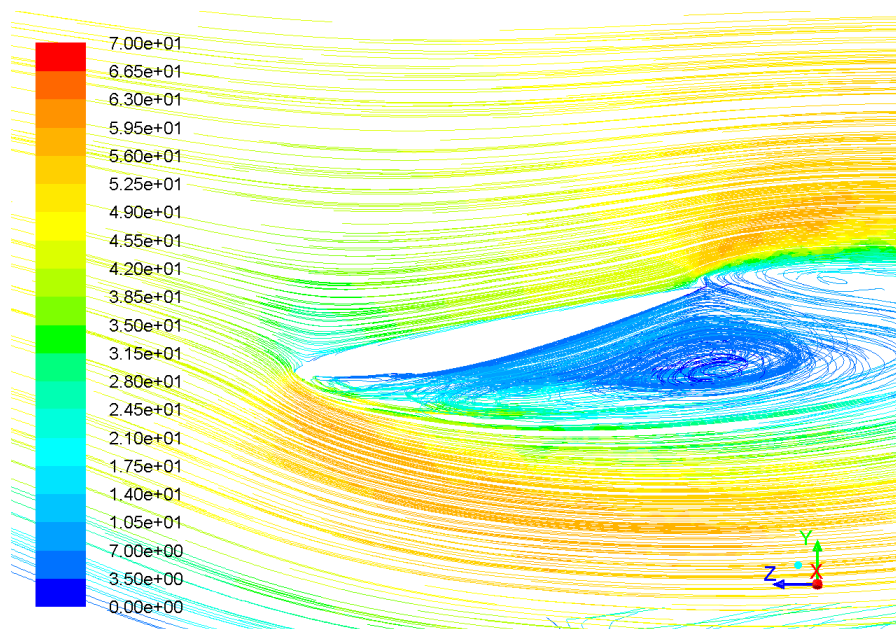


Fig. 6.15. Distribució de línies de corrent a l'aleró amb l'ajust 1. Unitats: m/s



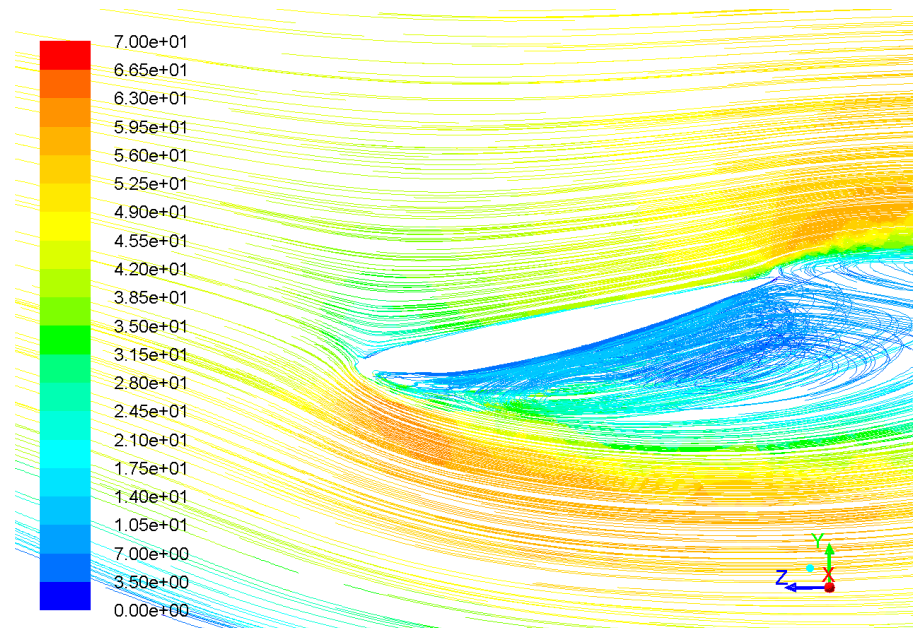


Fig. 6.16. Distribució de línies de corrent a l'aleró amb l'ajust 2. Unitats: m/s

7. Simulació de cursa

Un cop s'han obtingut els coeficients aerodinàmics i s'ha assegurat que es compleixen els criteris de maniobrabilitat per a cada ajust, a més de fer la pertinent visualització del comportament del flux amb cada millora i configuració per poder fer una anàlisi comparativa entre ambdues i així fer-se una idea de com es pot optimitzar cadascuna, ja es podrien dissenyar i fabricar les millores per incorporar-les al model real. Tot i això, el vehicle no estaria encara preparat per competir. Donat que tot l'estudi s'ha dut a terme mitjançant CFD, el qual simula el comportament real del flux d'aire amb resultats aproximats, és necessari fer altres estudis. En automobilisme, s'empra el que es coneix com túnel de vent, que en termes generals, és una cambra que pot generar corrents d'aire com les que es produeixen quan el vehicle està circulant, i a on s'ubica el model a estudiar. Així, es poden recrear les mateixes condicions que s'utilitzen en el CFD però en el món real, i efectuar així una comparativa per assegurar que els resultats que s'obtenen són semblants en els dos casos. Per últim, l'estudi més fidedigne que es pot fer és efectuar tests al circuit a on es vol competir amb les millores dissenyades i així comprovar que el vehicle es comporta realment com s'esperava.

Aquest treball abasta únicament la simulació mitjançant CFD, així que no és possible dur a terme cap dels altres dos estudis. El que sí es pot efectuar és una simulació d'una volta a un circuit qualsevol mitjançant programari dissenyats per a tal fi. El programa emprat en aquest cas és l'Optimum Lap, dissenyat per la companyia Optimum G, amb el qual es poden calcular valors com temps per volta, velocitat màxima i acceleració màxima a les corbes, definint només les característiques bàsiques de l'automòbil. Aquestes característiques són: massa del vehicle, tipus de tracció, coeficients aerodinàmics, tipus de roda i el seu coeficient de fricció, gràfica Parell-Potència motor/rpm i relació de transmissió. A la figura 7.1 es mostra la interfície del programa.

El procés que s'ha dut a terme és definir tres configuracions (model de sèrie, ajust 1 i ajust 2) i fer una simulació en diferents circuits. Entre cada configuració només s'han variat els coeficients aerodinàmics. Així, els valors de les altres característiques del vehicle (motor, transmissió, neumàtics) pertanyen a les del model de sèrie, i són iguals en els tres casos (annex B). Això es degut a que en tot moment només s'han plantejat millores aerodinàmiques



i no s'ha dut a terme cap millora en altres aspectes, com pot ser la disminució de massa del vehicle o el canvi de motor per un més esportiu, ja que aquestes queden fora del tema tractat en aquest treball.

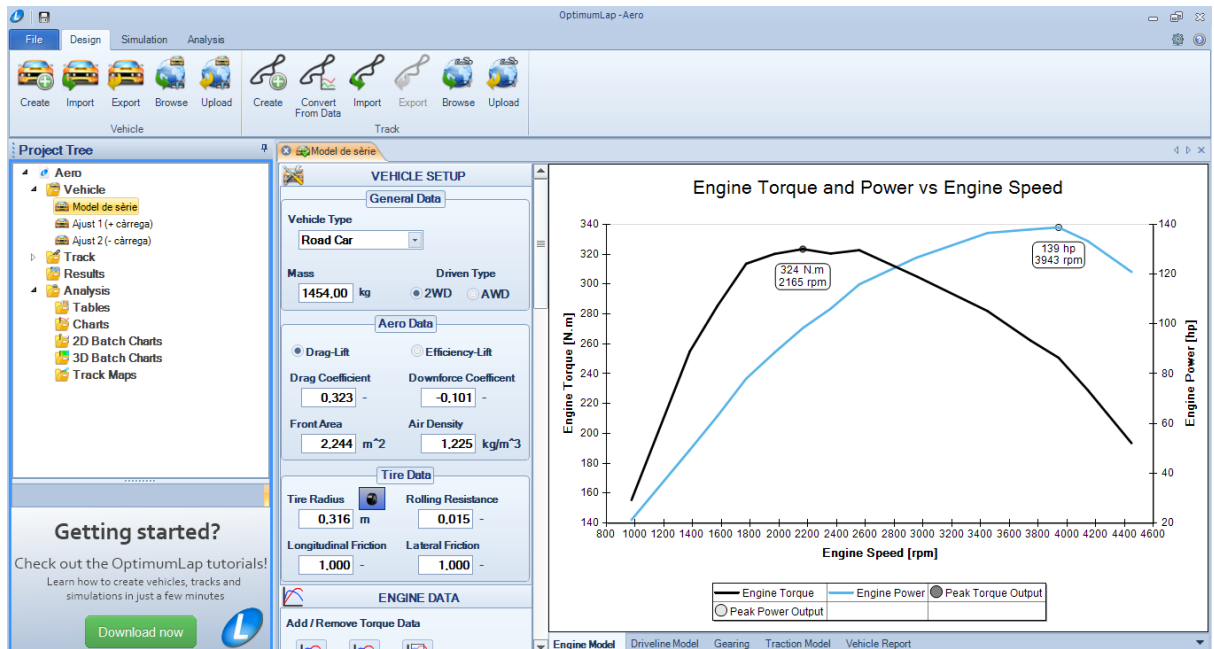


Fig. 7.1. Interfície del programa Optimum Lap

Cal esmentar que, donada la simplificació amb que es defineixen els paràmetres del vehicle, no es pot esperar una gran exactitud en els resultats. Per exemple, la part aerodinàmica queda només definida pels coeficients de drag i lift, l'àrea frontal i la densitat de l'aire, sense tenir en compte la posició del centre de pressions en cada ajust, la qual s'ha vist com influeix en la maniobrabilitat del vehicle. Tot i això, és una bona eina per comparar diverses configuracions i fer-se una idea de l'orde de magnitud de les diferències que es donen en les diverses prestacions per a un circuit donat.

A continuació, es mostren els resultats dels factors més importants i es fa una comparativa per veure quin ajust és el més òptim per a cada tipus de circuit. Cal tenir en compte que només s'han efectuat millores aerodinàmiques al model de sèrie i, per tant, no es poden esperar reduccions de segons per volta. Amb un vehicle més esportiu amb millors prestacions, es podrien aprofitar millor aquestes millores aerodinàmiques. Per tant, les diferències de temps que es mostren són orientatives, i han de servir per fer-se una idea de quina és la configuració idònia per a cada circuit.

7.1. Hungaroring. Circuit lent.

En aquest cas, es té un circuit molt lent, amb corbes tancades, i amb una única recta relativament llarga a la zona de sortida (taula 7.1 i figura 7.2). Interessa, per tant, una elevada càrrega aerodinàmica. S'observa com el millor temps s'aconsegueix amb l'ajust 1, el qual genera més downforce, amb una diferència de 0,63s per volta (taula 7.2). Tot i que s'ha reduït la velocitat màxima que es pot assolir, aquest desavantatge es veu compensat per l'augment d'acceleració lateral, que permet agafar les corbes a més velocitat, i de desacceleració longitudinal, fent que l'automòbil pugui frenar més tard i perdi menys temps també en agafar les corbes. També, per l'ajust 1, es té una acceleració longitudinal major, tot i l'augment és poc significatiu, principalment per les prestacions del motor.

Localització	Mogyorod, Hongria
Any d'inauguració	1986
Longitud	4.384 m
Corbes	14
Recta més llarga	674,56 m

Taula 7.1. Dades del circuit Hungaroring

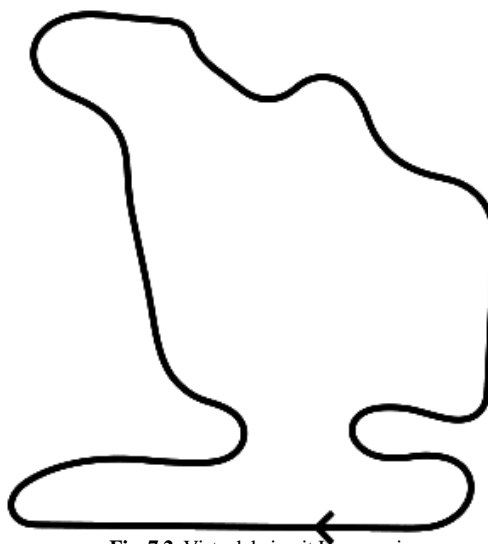


Fig. 7.2. Vista del circuit Hungaroring



	Ajust		
	De sèrie	1 (+ càrrega)	2 (- càrrega)
Temps per volta (s)	160,65	160,02	160,43
Velocitat màxima (km/h)	163,00	159,25	161,64
Velocitat mitjana (km/h)	103,82	103,94	103,86
Màxima acceleració lateral (m/s^2)	6,85	7,05	6,90
Màxima acceleració longitudinal (m/s^2)	3,18	3,20	3,19
Màxima desacceleració longitudinal (m/s^2)	-7,50	-8,21	-7,76

Taula 7.2. Resultats de la simulació al circuit Hungaroring

7.2. Autodromo Nazionale di Monza. Circuit ràpid

Es té ara la situació contrària que a Hungaroring. El circuit de Monza es caracteritza per les seves rectes de gran longitud, la més llarga de 1194 m, interrompudes només per chicanes (taula 7.3 i figura 7.3).. La velocitat mitjana és ara d'uns 30 km/h més alta que pel cas d'Hungaroring. El factor principal en aquest cas és poder assolir la màxima velocitat possible. S'observa que el millor temps s'obté amb el model de sèrie, ja que és el que menys drag produeix, donat que no té cap millora aerodinàmica (taula 7.4). Tot i això, com s'ha comentat anteriorment, el càlcul fet per Optimum Lap està simplificat, i hi ha alguns factors que no té en compte com, per exemple en aquest cas, la maniobrabilitat del vehicle. Així, tot i que el model de sèrie aconsegueix millors temps, no és segur competir amb aquest vehicle, ja que hi ha perill de que el cotxe pateixi sobreviratge degut al lift que es produeix a l'eix posterior. Per tant, l'ajust més òptim en aquest cas és l'ajust 2, amb menys càrrega aerodinàmica,

aconseguint una diferència de 0,7 segons menys per volta respecte a l'ajust 1.

Localització	Monza, Itàlia
Any d'inauguració	1922
Longitud	5.793 m
Corbes	11
Recta més llarga	1194 m

Taula 7.3. Dades del circuit de Monza

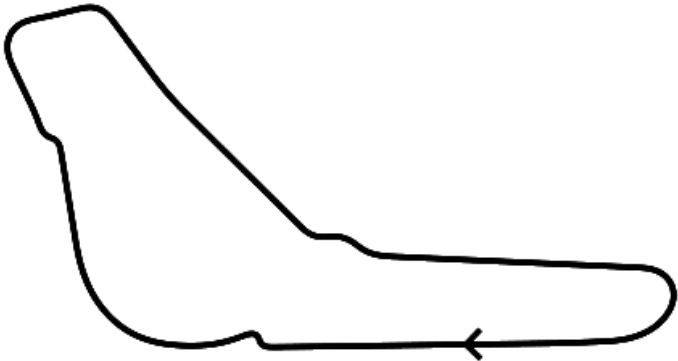


Fig. 7.3. Vista del circuit de Monza

	Ajust		
	De sèrie	1 (+ càrrega)	2 (- càrrega)
Temps per volta (s)	166,67	167,76	167,06
Velocitat màxima (km/h)	183,58	176,36	180,87
Velocitat mitjana (km/h)	134,82	133,03	134,17
Màxima acceleració lateral (m/s ²)	6,86	7,05	6,90
Màxima acceleració longitudinal (m/s ²)	3,15	3,16	3,15
Màxima desacceleració longitudinal (m/s ²)	-7,63	-8,48	-7,95

Taula 7.4. Resultats de la simulació al circuit de Monza



7.3. Silverstone. Circuit equilibrat

Per últim, s'ha fet una simulació de volta a un circuit equilibrat com és Silverstone. La seva combinació de zones amb rectes llargues junt amb zones de corbes lentes fan que s'hagi d'escollir un ajust que generi prou carga aerodinàmica sense que això comporti un augment excessiu de drag (taula 7.5 i figura 7.4). La velocitat mitjana és més alta que a Hungaroring però més baixa que Monza. La configuració més òptima és l'ajust 1, amb més càrrega aerodinàmica, amb una reducció de temps de 0,71 segons per volta (taula 7.6). Amb aquest resultat es pot extreure que s'ha aconseguit una bona configuració pel cas de l'ajust 1, ja que el drag addicional que provoca no és tan gran comparat amb el downforce que genera. Així, tot i que es té el desavantatge de perdre velocitat punta a les rectes, aquest es veu compensat pel millor rendiment que ofereix a les corbes.

Localització	Silverstone, Anglaterra
Any d'inauguració	1947
Longitud	5.901 m
Corbes	14
Recta més llarga	890 m

Taula 7.5. Dades del circuit Silverstone

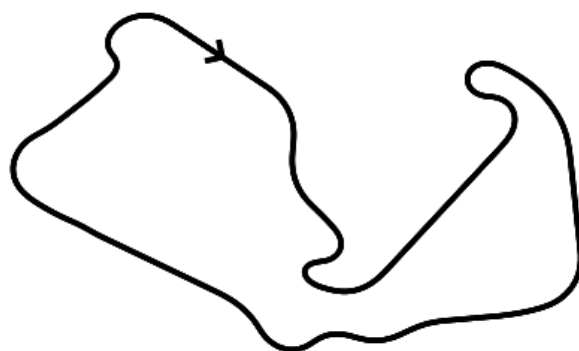


Fig. 7.4. Vista del circuit Silverstone

	Ajust		
	De sèrie	1 (+ càrrega)	2 (- càrrega)
Temps per volta (s)	186,21	185,50	185,94
Velocitat màxima (km/h)	169,57	165,03	167,93
Velocitat mitjana (km/h)	120,64	120,71	120,67
Màxima acceleració lateral (m/s²)	6,86	7,14	6,93
Màxima acceleració longitudinal (m/s²)	3,15	3,16	3,16
Màxima desacceleració longitudinal (m/s²)	-7,49	-8,20	-7,75

Taula 7.6. Resultats de la simulació al circuit Silverstone



8. Planificació temporal i pressupost

S'exposa a continuació els passos que s'han seguit en la elaboració d'aquest projecte, així com el temps dedicat a cadascun d'ells. Es mostra també el càlcul del pressupost derivat de la realització d'aquest treball.

8.1. Planificació temporal

La duració total del projecte és de 16 setmanes, començant la primera setmana de Març. La planificació seguida es mostra a la figura 8.1.

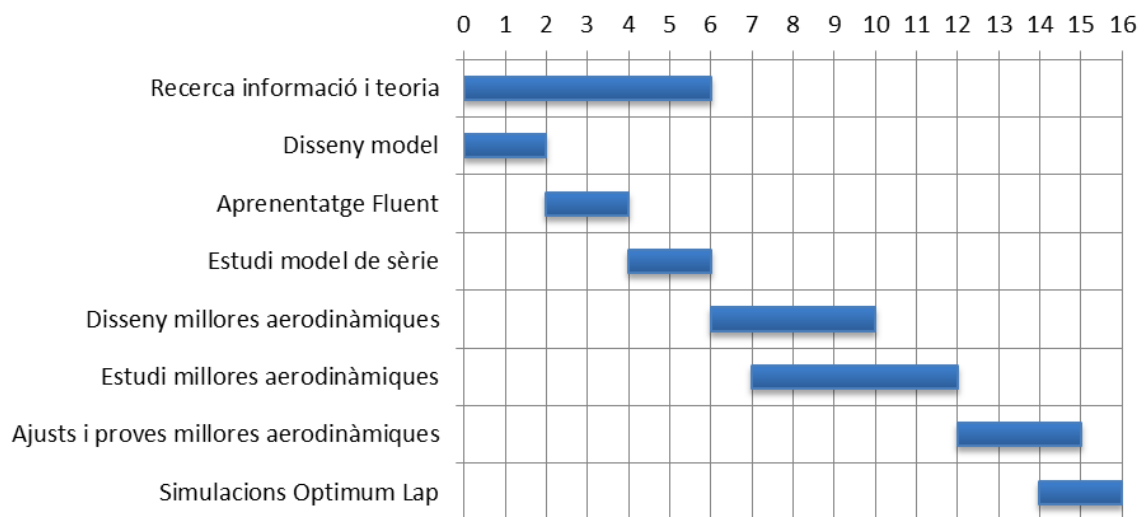


Fig. 8.1. Planificació de les diferents activitats portades a terme durant al llar del projecte

Es distingeixen dues parts principals del projecte. La primera part centrada en l'aprenentatge de la teoria de l'aerodinàmica i de l'ús de fluent, així com en el disseny i la simulació del model de sèrie. Aquesta dura un total de 6 setmanes. A la segona part és on es realitza el disseny, anàlisi i ajust de les millores aerodinàmiques i, per últim, la simulació en circuit del model amb cada ajust. Aquesta dura 10 setmanes i completa la duració total del projecte de 16 setmanes.

Algunes activitats es poden efectuar en paral·lel, com la recerca d'informació i teoria, ja que part d'aquesta està encarada a estudiar com fer servir Fluent especialment per a aquest treball d'una manera òptima i a validar els resultats obtinguts amb el primer estudi del model de sèrie. Altres activitats que es poden dur a terme són el disseny i estudi de les millores

aerodinàmiques, ja que mentre unes s'estan simulant, es pot cercar informació de la següent millora aerodinàmica i fer els primers dissenys i càlculs teòrics.

En algunes de les activitats s'ha de tenir en compte dificultats i problemes imprevistos que han sorgit, fent que la duració de l'activitat s'allargués. Aquesta situació s'ha donat en parts com en l'estudi del model de sèrie, ja que al ser la primera anàlisi que s'efectuava s'ha hagut de buscar solucions als diferents problemes que sorgien per primer cop. També en el disseny i anàlisi de les diferents millores han sorgit inconvenients, ja que el model augmentava de complexitat amb cada millora, i el seu mallat i convergència de la solució esdevenia cada cop més difícil. Amb tot, s'ha aconseguit dur a terme el projecte dintre del període fixat.

8.2. Pressupost

Per calcular els costos d'aquest projecte, es considera un enginyer junior contractat per un particular, al qual se li ha fet l'estudi i disseny de cada millora aerodinàmica, així com les diferents configuracions, pel seu vehicle propi. Queda fora d'aquest àmbit, per tant, la fabricació i instal·lació d'aquestes millores. D'aquesta manera, es té en compte primer uns honoraris a cobrar pels coneixements i temps invertits en el projecte. Es fixa el sou base d'un enginyer junior en 25 €/h. Els costos per honoraris de col·laboradors són nuls, ja que no s'ha requerit d'un professional extern per dur a terme cap dels càlculs i anàlisis presents en el projecte. En quant als costos generals, s'han d'afegir al cost total del pressupost. Cadascun es calcula de manera diferent, depenent de a quina despesa es refereix. Pel cas d'aquest projecte, es distingeixen dos tipus:

- Costos de consum: engloba totes les despeses generades per poder dur a terme el projecte, com pot ser l'electricitat consumida per fer les simulacions. Donat que el seu càlcul és complicat, es fixa el seu cost com un 5% del sou base, fent que el sou final a cobrar sigui de 26,25 €/h.
- Costos d'amortització: per fer les simulacions es necessita un ordinador i els diferents programes de disseny i càlcul, amb les seves corresponents llicències. Donat que la seva compra no es fa especialment per a aquest projecte, ja que continuaran servint per possibles projectes posteriors, es treballa amb costos d'amortització. Aquests tenen en compte només l'ús que se'ls ha donat per fer aquest projecte. El procediment per calcular aquests costos és dividir el preu del bé pel seu temps d'amortització, el qual està tabulat, i multiplicar pel seu temps d'ús en el projecte. En el cas d'un ordinador, el temps d'amortització és de 2 anys. Pel que fa a les llicències, aquestes s'han



d'actualitzar anualment, donat que surt una nova versió del programa. En aquest cas, les llicències necessàries són les d'Ansys i Solidwork. Optimum Lap no requereix llicència, ja que aquest és gratuït.

Pel temps de treball total emprat, es considera que s'ha treballat cada setmana un mitjana de temps de 20 hores, fent un total de 320 hores treballades. A la taula 8.1 es mostra el desglossament dels costos i el preu total.

Concepte	Cost obtenció	Temps amortització	Preu/temps	Temps	Preu
Sou base	-	-	25 €/h	320 h	8.000 €
Costos de consum	-	-	1,25 €/h	320 h	400 €
Amortització ordinador	700 €	24 mesos	29,17 €/mes	4 mesos	116,67 €
Amortització llicència Fluent	1.000 €	12 mesos	83,33 €/mes	4 mesos	333,33 €
Amortització llicència SolidWorks	1500 €	12 mesos	125 €/mes	4 mesos	500 €
				Preu Total	9.350 €

Taula 8.1. Desglossament dels costos i el preu total

9. Impacte Ambiental

Un cop presentats els resultats d'aquest projecte amb els dissenys de les millores aerodinàmiques, aquestes seran fabricades i instal·lades per la persona interessada. Es pot avaluar quin impacte ambiental comportarà la realització d'aquest projecte.

Cal recordar, primerament, que l'abast del treball s'estén únicament al disseny i simulació de les millores aerodinàmiques emprant un ordinador. Així, en aquest cas, l'únic impacte ambiental que es pot donar és el consum d'electricitat necessària per a dur a terme el disseny i les simulacions del model i de les seves millores. L'impacte més significatiu es donarà en els passos posteriors, amb la fabricació i ús d'aquestes millores, fora de l'abast d'aquest projecte.

Un dels efectes principals és que, com s'ha vist al llarg del treball, a l'incorporar millores aerodinàmiques a l'automòbil, el seu drag augmenta. Aquest fet deriva en un major consum de benzina del vehicle, donat a que es trobarà amb una resistència a l'avanç major, a més de veure augmentada la seva velocitat mitjana per volta, fet que també comporta un major consum de benzina. S'ha de tenir present que l'objectiu del treball és adaptar un automòbil de turisme a la competició. En aquest cas, es busca treure el màxim profit de les prestacions d'un vehicle i, per tant, sempre es produirà un consum més elevat de benzina i una major contaminació per l'expulsió dels gasos de la combustió. Mitjançant Optimum Lap, es pot calcular la quantitat de combustible gastat en una volta a un circuit escollit. Fixant un rendiment tèrmic del motor d'un 25%, es té la següent comparativa entre el model de sèrie i l'ajust 1 (més càrrega) en el circuit de Hungaroring (taula 9.1).

	Model	
	De sèrie	Ajust 1
Energia consumida per volta [kJ]	8821,52	9046,19
Consum de benzina per volta [kg]	0,75	0,77
Consum de benzina cada 100 km [kg/km]	17,11	17,56

Taula 9.1. Comparativa entre el consum de benzina del model de sèrie i l'ajust 1 en el circuit Hungaroring.



La diferència és de 0,45 kg de benzina cada 100 km. Amb el següent càlcul, es mostra quant representa aquesta diferència en quantitat de CO₂ produït.

Dades:

Densitat gasolina: 0,68 kg/litre

Emissió de CO₂ per litre de gasolina: 2,19 kg/litre

$$\text{Diferència emissió CO}_2 = 0,45 \cdot \frac{\text{kg gasolina}}{100 \text{ km}} \cdot \frac{1 \text{ litre gasolina}}{0,68 \text{ kg gasolina}} \cdot \frac{2,19 \text{ kg CO}_2}{1 \text{ litre gasolina}} = 1,45 \frac{\text{kg CO}_2}{100 \text{ km}}$$

S'observa que l'augment de contaminació no és excessivament elevat, ja que el mateix model de sèrie conduït per ciutat emet 17,86 kg cada 100 km (annex B). S'ha de tenir en compte també que, un cop s'han instal·lat les millores a l'automòbil, el seu ús estarà restringit únicament a la competició, fent que en global es facin menys quilometres a l'any que els que es fan amb un automòbil de turisme. Es pot extreure, per tant, que el projecte no té un impacte ambiental significatiu.

10. Conclusions

A partir dels resultats obtinguts, es pot confirmar que s'han complert els objectius establerts. S'han dissenyat i estudiat diferents millores aerodinàmiques i s'han ajustat de dues maneres diferents, amb més i menys generació de càrrega aerodinàmica. Les simulacions a diferents circuits posen de manifest com són necessaris aquests ajustos per adaptar el vehicle a les diferents característiques del circuit. En quant a la millora aconseguida, pot semblar que aquesta és petita, ja que la reducció de temps per volta més elevada és de 0,7 segons. No obstant, s'ha de tenir en compte que, per exemple, en les classificacions que s'efectuen a les competicions abans de la cursa per decidir l'ordre de sortida, s'acostumen a disputar les primeres posicions per diferències de temps de poques dècimes. També s'ha de tenir en compte que la simulació s'ha dut a terme considerant que el vehicle es manté constantment sobre la traçada òptima. En la realitat, el pilot agafarà les corbes segons la sensació de control que tingui sobre el cotxe. Amb l'augment de maniobrabilitat que atorguen les diferents millores aerodinàmiques, el pilot sentirà un major control sobre el comportament del vehicle, fet que li farà tenir més confiança i podrà conduir més agressivament, reduint els temps per volta. Per últim, s'ha de recordar que només s'han efectuat millores aerodinàmiques. Cal esperar que amb el mateix vehicle amb unes prestacions majors es podrien aprofitar aquestes millores més òptimament, ja que, per exemple, un motor més potent permetria que l'augment de drag no fos tant perjudicial, alhora que permetria assolir majors velocitats a les corbes i, gràcies a la major càrrega aerodinàmica generada, podria agafar-les sense perill de perdre el control.

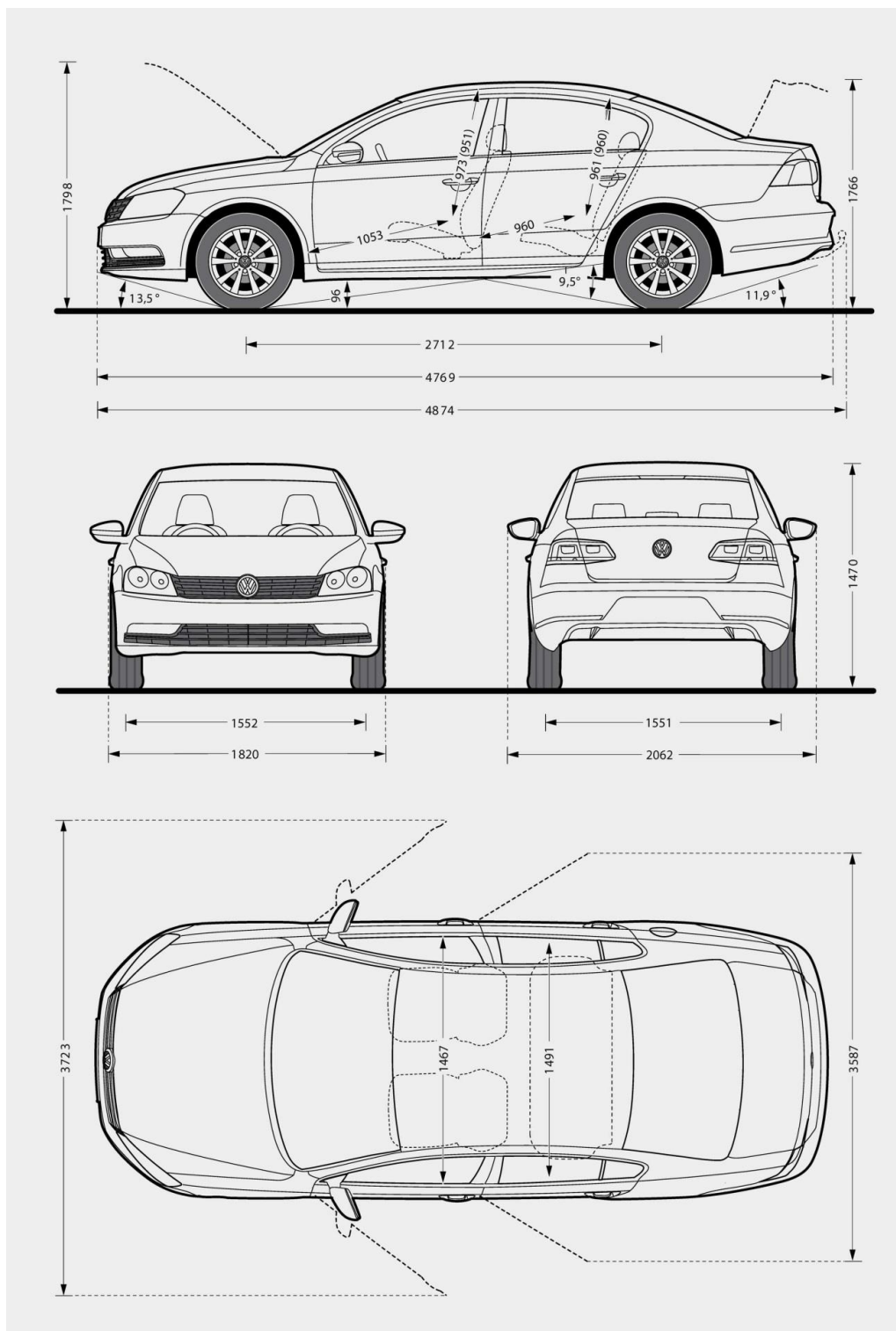
Un altra resultat addicional que s'ha extret és la diferència de comportament de les millores aerodinàmiques quan aquestes s'estudien de forma aïllada respecte a quan s'estudien instal·lades a l'automòbil. Així, s'ha pogut observar com l'spoiler davanter no aconsegueix generar una estela suficientment gran per mantenir el buit a la part inferior, degut principalment a l'elevada separació entre el terra i el fons del model. Pel cas dels faldons, s'ha pogut comprovar com el seu funcionament pot variar completament i, depenent de la diferència de pressions entre la part inferior i els laterals, pot actuar com a reductor de drag, alhora que augmenta el lift, o com la seva funció original, que és mantenir el buit de la part inferior generat per l'spoiler davanter. Per últim, es té l'aleró, on es dona la major diferència, degut a que les línies de corrent no incideixen horitzontalment, obtenint un comportament diferent, sobretot per a angles d'atac més elevats, generant més downforce però, alhora, més drag. S'extreu, per tant, com no es poden estudiar les millores aerodinàmiques per separat, sobretot les que s'ubiquen a la part posterior del model, donada la interacció que es dona entre



elles i amb la pròpia geometria del model. En aquest aspecte, les simulacions mitjançant CFD aporten un gran avantatge, ja que es poden fer estudis del model complet amb totes les millores instal·lades i dur a terme ajustos i optimitzacions emprant únicament un ordinador. D'aquesta manera, no es necessari fabricar i provar cadascuna de les millores amb els diferents ajustos en el model real. Tot i això, un cop s'ha arribat a l'ajust òptim, sí és necessari dur a terme un estudi complementari en un túnel de vent i en el propi circuit per assegurar-se que els resultats són correctes.

11. Annexos

A. Plànols model. Volkswagen Passat B6.



B. Taula característiques tècniques Volkswagen Passat B6.

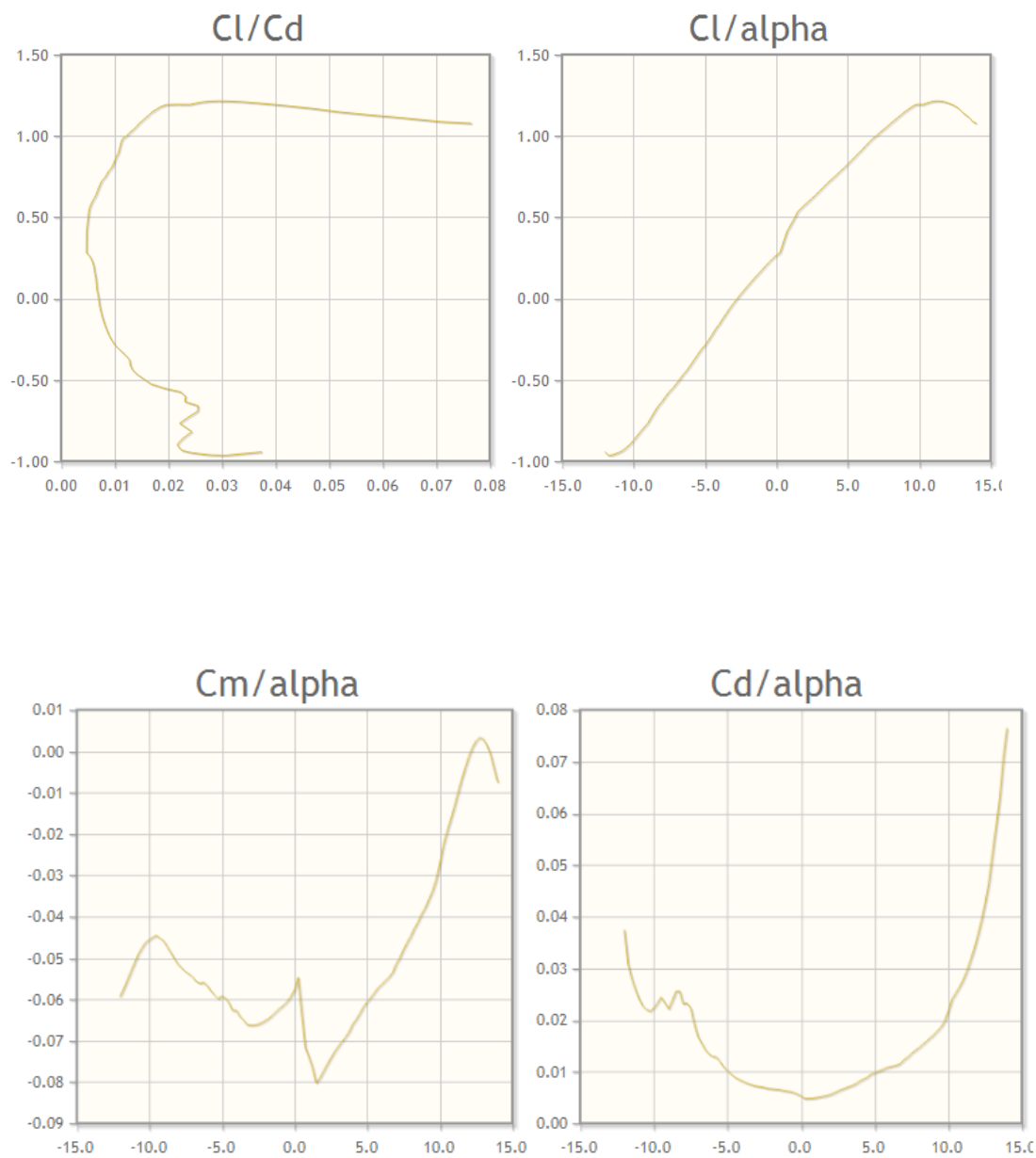
Marca	Volkswagen
Model	Passat
Generació	Passat (B6)
Motor	2.0 TDI
Pes	1454 kg.
Potència màxima	139 CV/3943 rpm
Tracció	Davantera
Parell motor màxim	324 Nm/2165 rpm
Número d'engranatges (transmissió manual)	6
Mida del neumàtic	205/55 R16
Coefficient de fricció neumàtic-terra	0,7
Emissió de CO₂	17,86 kg/100 km

C. Gràfiques Gottingen 795

Gràfiques per $Re=10^6$

Càlcul Reynolds de funcionament:

$$Re = \frac{V_{\infty} \cdot c \cdot \rho}{\mu} = \frac{50 \cdot 0,3 \cdot 1,225}{1,79 \cdot 10^{-3}} = 1,0265 \cdot 10^6$$



12. Bibliografia

- [1] SAE, Society of Automotive Engineers, Inc. *Aerodynamics of Road Vehicle (4th Edition)*. Warrendale, Pa: 1998, pag. 144.
- [2] MARCO LANFRIT. *Best practice guidelines for handling Automotive External Aerodynamics with Fluent (version 1.2)*. Darmstadt, Germany: 2005, pag. 8
- [3] SAE, Society of Automotive Engineers, Inc. *Aerodynamics of Road Vehicle (4th Edition)*. Warrendale, Pa: 1998, pag. 182.
- [4] SAE, Society of Automotive Engineers, Inc. *Aerodynamics of Road Vehicle (4th Edition)*. Warrendale, Pa: 1998, pag. 72.
- [5] SAE, Society of Automotive Engineers, Inc. *Aerodynamics of Road Vehicle (4th Edition)*. Warrendale, Pa: 1998, pag. 242.
- [6] SAE, Society of Automotive Engineers, Inc. *Aerodynamics of Road Vehicle (4th Edition)*. Warrendale, Pa: 1998, pag. 251.
- [7] MCBEATH, SIMON. *Aerodinámica del vehículo de competición (1a Edición)*. Sparkford, England: 2000, pag. 58.
- [8] MCBEATH, SIMON. *Aerodinámica del vehículo de competición (1a Edición)*. Sparkford, England: 2000, pag. 59-60.
- [9] MCBEATH, SIMON. *Aerodinámica del vehículo de competición (1a Edición)*. Sparkford, England: 2000, pag. 81-82.
- [10] ANDERSON JR., JOHN D. *Fundamentals of Aerodynamics (3rd Edition)*. New York, NY: 2001, pag. 330-331.
- [11] MCBEATH, SIMON. *Car wing angle*.
[<http://www.sm-designs.ndo.co.uk/advice.html#angle>]
- [12] SAE, Society of Automotive Engineers, Inc. *Aerodynamics of Road Vehicle (4th Edition)*. Warrendale, Pa: 1998, pag. 386.

Bibliografia imatges

Fig. 3.1. [<http://www.gmecca.com/byorc/images/liftdownforce.gif>]

Fig. 3.2. [<http://www.gmecca.com/byorc/images/underbody.gif>]

Fig. 3.3. ANDERSON JR., JOHN D. *Fundamentals of Aerodynamics* (3rd Edition). New York, NY: 2001, pag. 29

Fig. 3.4.

[[http://the-contact-patch.com/figure/C1416-Streamlines-1423780583.jpg?transform=\[rs%3A590|600|f\]](http://the-contact-patch.com/figure/C1416-Streamlines-1423780583.jpg?transform=[rs%3A590|600|f])]

Fig. 3.5. [<http://history.nasa.gov/SP-4103/p529.jpg>]

Fig. 3.6. [http://hmf.enseeiht.fr/travaux/bei/beiep/sites/default/files/users/amolinie2/flat_plate.gif]

Fig. 3.7. [<http://www.tutorhelpdesk.com/UserFiles/Boundary%20layer%20separation.jpg>]

Fig. 4.20. JOSEPH KATZ. *Race car aerodynamics*. San Diego State University, San Diego, California: 2006, pag. 3

Fig. 5.1. MCBEATH, SIMON. *Aerodinámica del vehiculo de competición (1a Edición)*. Sparkford, England: 2000, pag. 59

Fig. 5.5. MCBEATH, SIMON. *Aerodinámica del vehiculo de competición (1a Edición)*. Sparkford, England: 2000, pag. 74

Fig. 5.8. MCBEATH, SIMON. *Aerodinámica del vehiculo de competición (1a Edición)*. Sparkford, England: 2000, pag. 95

Fig. 5.15. [<http://www.sm-designs.ndo.co.uk/advice.html#angle>]

Fig. 5.21. MCBEATH, SIMON. *Aerodinámica del vehiculo de competición (2a Edición)*. Sparkford, England: 2005, pag. 53

Fig. 5.22. MCBEATH, SIMON. *Aerodinámica del vehiculo de competición (2a Edición)*. Sparkford, England: 2005, pag. 114

Fig. 5.23. MCBEATH, SIMON. *Aerodinámica del vehiculo de competición (2a Edición)*. Sparkford, England: 2005, pag. 70

